

Introduktion av pyrolysanläggning i Eksjö fjärrvärmenät

– En undersökning om pyrolysanläggningars
förutsättningar och eventuella roll inom
fjärrvärmeproduktion

*Evaluation of slow pyrolysis technology in Eksjö district
heating system*

*– A study of the potential role of combined biochar and
energy production in district heating systems*

Karl Malmberg

Introduktion av pyrolysanläggning i Eksjö fjärrvärmenät. En undersökning om pyrolysanläggningars förutsättningar och eventuella roll inom fjärrvärmeproduktion.

Evaluation of slow pyrolysis technology in Eksjö district heating system.
A study of the potential role of combined biochar and energy production in
district heating systems.

Karl Malmberg

Handledare: Cecilia Sundberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Ämnesgranskare: Gunnar Larsson, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 10 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A1N, teknik

Kurstitel: Projektarbete i energisystem

Kurskod: TE0013

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Kursansvarig institution: energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2021

Serietitel: Projektarbete i energisystem, institutionen för energi och teknik, SLU

Delnummer i serien: 202:01

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Biokol, Värmeproduktion, Kolsänka, Sågverk, Biprodukter

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Läs om SLU:s publiceringsavtal här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Abstract

In order to fulfill the Swedish national goal of achieving climate neutrality by 2045, the implementation of negative emission technologies is regarded as a vital tool, since it can compensate for emissions deemed too hard to avoid. The widespread use of district heating systems, in combination with a relatively large forest industry in Sweden, provides a unique opportunity to implement combined biochar and energy production (BCE). With BCE technology, biogenic carbon is stabilized in the form of biochar in a timespan long enough for new biomass to replace the one used for BCE, thus generating the negative emissions sought after. This project investigates the possibility of producing biochar and energy through slow pyrolysis in the three district heating systems located in the municipality of Eksjö using byproducts from local sawmills as feedstock. The different roles BCE might come to play in the local energy system and their respective effect on greenhouse gas emissions from the production of district heating are evaluated.

The implementation of BCE technology in the current district heating systems is examined through simulating different scenarios with various installed pyrolysis plant heat production capacity by using a model in the software MATLAB. The results of the simulations indicate that an implementation of BCE technology in the district heating systems can cause significant reductions of greenhouse gas emissions and might lower the production cost of district heating. The lowered production cost indicate that BCE units are advantageous compared with heat only boilers that produce heat through combustion of biomass in the current systems. It should be noted that the retroactive income generated from selling the produced biochar is included in calculating production costs, and that a thorough comparison of the capital expenditures between the two technologies is outside the scope of this study. The BCE units cannot compete with combined heat and power production through energy recovery from municipal solid waste in terms of heat production cost. This leads to fewer operation hours for BCE units in the district heating system in the city of Eksjö compared to BCE units in the smaller district heating system in the municipality where BCE units would produce the base load.

The three district heating systems in the municipality of Eksjö produced a total of 150 GWh district heat in 2019. The emissions of greenhouse gases caused by the current production of district heat amounts to 17,000 ton CO₂-eq annually. It is estimated that BCE-units producing base load with a total installed heat production capacity of 4,1 MW are required, if the production of district heat is to be climate neutral. The heat produced from such BCE-units would amount to 36 GWh, thus 24 % of the total production of district heat. The units would produce approximately 6,180 tons of biochar and require an 88,3 GWh worth of biomass feedstock. The local sawmills contacted in this project produce approximately 271 GWh worth of biomass as byproduct, enough to enable the district heat production to achieve climate neutrality using BCE technology.

Sammanfattning

För att klara av nationella målsättningar om klimatneutralitet till år 2045 menar många att det krävs tekniker som genererar netto negativa utsläpp. Användningen av biobränslen i de svenska fjärrvärmesystemen ger goda förutsättningar för implementering av kombinerad biokol- och energiproduktion (BCE) där de biogena koldioxidutsläppen fångas in och lagras och på så sätt genererar netto-negativa utsläpp. Projektet undersöker förutsättningarna för att producera biokol och energi genom långsam pyrolys i tre fjärrvärmenät i Eksjö kommun med biprodukter från lokala sågverk som biobränsle. Olika eventuella roller som BCE kan spela i framtida energisystem i Eksjö kommun och hur det påverkar fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan utvärderas.

Genom att utgå från befintliga fjärrvärmenät undersöks effekterna av BCE anläggningar genom simulering i programmet MATLAB där olika dimensioner på anläggningarna testas. Resultatet av simuleringarna tyder på att BCE-anläggningarna minskar den rörliga produktionskostnaden för värme i systemet. När de retroaktiva intäkterna från försäljning av biokol är inkluderade i beräkningen av den rörliga produktionskostnaden av värme i BCE-anläggningarna får de en lägre rörlig produktionskostnad jämfört med de befintliga biobränsleeldade värmepannorna. Värmeproduktion med BCE-anläggningar beräknas ha högre rörlig produktionskostnad jämfört med energiåtervinning av avfall vilket kan leda till färre drifttimmar för en BCE-anläggning i det större fjärrvärmenätet i Eksjö jämfört med i de mindre näten där de i simuleringarna producerar baslast.

De tre fjärrvärmeverken i Eksjö kommun producerade sammanlagt runt 150 GWh värme år 2019. Utsläppen av växthusgaser från dagens fjärrvärmeproduktion i Eksjö kommun beräknas vara drygt 17 000 ton CO₂-eq per år. Det beräknas kräva baslastproduktion av BCE-anläggningar med totalt 4,1 MW termisk effekt för att fjärrvärmeproduktionen i Eksjö ska bli klimatneutral. Fjärrvärmeproduktionen från dessa anläggningar skulle uppgå till 36 GWh per år och stå för 24 % av den totala fjärrvärmeproduktionen i kommunen. BCE-anläggningarna beräknas i det fallet producera 6180 ton biokol per år och förbruka runt 88,3 GWh biobränsle per år. De sågverk som medverkar i projektet producerar runt 271 GWh biobränsle och kan således tillgodose behovet på biobränsle. En undersökning om befintliga pyrolysanläggningar på marknaden genomfördes där det återfanns BCE-anläggningar i dimensionerna som krävs för att uppnå klimatneutralitet.

Innehållsförteckning

<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Sammanfattning</i>	<i>iii</i>
1. Introduktion	1
1.1 Syfte	1
1.2 Mål och Frågeställning	1
2. Bakgrund	2
2.1 Systembeskrivning.....	2
2.2 Långsam pyrolys och biokol.....	2
2.3 Pyrolysteknikens mognadsgrad	4
2.3.1 Genomförda projekt i Sverige och Europa	4
2.3.2 Pyrolyisreaktorer på marknaden	5
2.3.3 Exempel på kostnadskalkyl	6
2.4 Användningsområden och marknad för biokol	7
2.4.1 Koldioxidinfångning och kompensering	7
2.4.2 Biokolsmarknad	7
2.5 Lokal data från Eksjö	8
2.5.1 Massanalys	8
2.5.2 Befintligt Fjärrvärmesystem och Energibehov	9
3. Metod	10
3.1 Modellering av Fjärrvärmenät	10
3.1.1 Beskrivning av simuleringsmodell	10
3.1.2 Simulering av BCE-anläggning	11
3.1.3 Beskrivning av scenarier.....	12
3.2 Beräkning av klimatpåverkan.....	14
3.3 Känslighetsanalys	15
4. Resultat	16
4.1 Ingatorp och Mariannelund	16
4.2 Eksjö	19
4.3 Känslighetsanalys	22
5. Diskussion	26
5.1 Sammanfattning av resultat	26
5.2 Ökad efterfrågan på biomassa	27
5.3 Klimatpåverkan.....	27
5.4 Marknad för biokol.....	28
5.5 Konkurrerande teknik och investeringskostnader	29
6. Slutsatser	30
<i>Referenser</i>	<i>31</i>
<i>Bilagor</i>	<i>35</i>
Bilaga A. Massanalys	35

Bilaga B. Exempel Modellinställningar	37
--	-----------

1. Introduktion

Sveriges riksdag har beslutat följa ett klimatpolitiskt ramverk med målsättningen att Sverige ska ha netto- noll utsläpp av växthusgaser senast år 2045 (Naturvårdsverket 2020a). För att lyckas uppfylla de uppsatta klimatmålen krävs en omställning till ett hållbart energisystem där fossila energislag fasas ut. Då vissa utsläpp är svåra att åtgärda anses implementering av tekniker som ger upphov till nettonegativa utsläpp av växthusgaser (NET) som kan kompensera för dessa utsläpp viktiga för att nå klimatmålen (Naturvårdsverket, 2020b). En statlig utredningen lyfter fram att användningen av biobränslen i de svenska fjärrvärmesystemen ger goda förutsättningar för implementering av bio-energy with carbon capture and storage (BECCS), samt combined biochar and energy production (BCE), där de biogena koldioxidutsläppen fångas in och lagras och på så sätt genererar netto-negativa utsläpp (SOU 2020:4). Detta projekt ämnar undersöka möjligheten att implementera BCE, kombinerad biokol- och energiproduktion genom långsam pyrolys, i fjärrvärmenät i Eksjö kommun. Då Eksjö ligger i en region där det bedrivs mycket skogsbruk och det finns flera sågverk inom Eksjö kommun skall även en massflödesanalys utföras för att undersöka hur mycket bi/restprodukter som bildas vid dessa sågverk och huruvida detta kan täcka behovet av biobränsle till BCE-anläggningarna.

1.1 Syfte

Syftet med detta projekt är att undersöka effekterna av och förutsättningarna för implementering av pyrolysreaktorer som genom långsam pyrolys av lokalt producerad biomassa producerar biokol och där energin som blir över från processen producerar el och värme till fjärrvärmenät belägna i Eksjö kommun. Projektet önskar belysa potentialen BCE har för att uppnå de inblandade lokala aktörernas klimat- och hållbarhetsmål.

1.2 Mål och Frågeställning

Målet med projektet är att utvärdera eventuella roller som pyrolysreaktorer kan komma att fylla i energiproduktionen i Eksjös el – och fjärrvärmenät samt kvantifiera dess klimatpåverkan.

Projektet ämnar besvara följande frågeställningar:

- Vilken total termisk effekt på BCE-anläggningar krävs för att fjärrvärmeproduktionen i Eksjö kommun ska bli klimatneutral?
- Hur kommer energiproduktionen i fjärrvärmenätet fördelas vid implementering av BCE och hur kommer produktionskostnaden att påverkas?
- Finns det pyrolysanläggningar på den befintliga marknaden som motsvarar dimensionerna som krävs för att uppnå klimatneutral fjärrvärmeproduktion?
- Kan efterfrågan på biobränsle tillgodoses av de lokala sågverkens biprodukter?

2. Bakgrund

I detta avsnitt definieras projektets systemgränser och avgränsningar följt av en kort beskrivning om produktion av biokol genom långsam pyrolys. Vidare sammanställs innehåll från den litteraturstudie som föranlett antaganden i produktionsparametrar och andra faktorer.

2.1 Systembeskrivning

Projektet undersöker implementeringen av biokolsproduktion i fjärrvärmenäten i Eksjö kommun, där även sågverk som är potentiella leverantörer av biobränsle är belägna. Eksjö kommun ligger i Jönköpings län. Eksjö energi driver tre olika fjärrvärmenät i Eksjö kommun, två mindre nät belägna i tätorterna Ingatorp och Mariannelund och ett större nät i Eksjö. Utöver BCE-anläggningarnas potentiella roll i fjärrvärmeproduktionen undersöks även hur mycket biobränsle två sågverk belägna i kommunen producerar som biprodukt och om det täcker behovet från eventuella pyrolysanläggningar. De påverkanskategorier som undersöks är klimatpåverkan, produktionskostnad samt förbrukning av biobränsle.

Projektet är geografiskt avgränsat till Eksjö kommun gällande både tillgång till biobränsle och energiproduktion. Sågverket som drivs av Eksjö Hus är beläget i samma område som fjärrvärmeverket i Eksjö med ett avstånd på under 1 km, Vida Bruzas sågverk ligger närmare de två mindre fjärrvärmesystemen. Då ingen transportsträcka i systemet överstiger 15 km undersöks inte kostnader och klimatpåverkan från transport av bioenergi. För att uppskatta klimatpåverkan från implementeringen av pyrolyreaktorer i fjärrvärmesystemen beräknas utsläpp av växthusgaser per producerad enhet värme, kg CO₂-eq / MWh värme, samt utsläppen från systemens totala fjärrvärmeproduktion.

För att uppskatta förändringar i produktionskostnad beräknas förändring i pris per producerad enhet värme, kr/MWh, samt total produktionskostnad. Den beräknade produktionskostnaden baseras enbart på bränsleförbrukningen, där priset på bränsle antas vara fast, samt rörligt pris på el. Drift och underhållskostnader inkluderas ej i kostnadskalkylen, inte heller kapitalkostnader för investering.

En kort undersökning av biokolsmarknaden och potentiell efterfrågan på biokol genomförs men hur det producerade biokolet ska användas specificeras ej mer än att det inte förbränns. Vid beräkning av klimatpåverkan från användning av biokol ingår således endast lagringen av kol i biokolet, inte annan klimatpåverkan. Hur distributionen och försäljningen av det producerade biokolet ska gå till behandlas inte i projektet.

2.2 Långsam pyrolys och biokol

Detta avsnitt ämnar beskriva omvandling av biomassa till biokol via en process kallad långsam pyrolys. Först beskrivs biomassan i ursprunglig form, sedan vad som sker under pyrolys och vilka produkter detta genererar.

En låg fukthalt på biomassan som skall genomgå pyrolys är fördelaktigt, och biomassan bör torkas till en fukthalt på runt 10 vikt-%. Förutom vatten består biomassa till största del av cellulosa, hemicellulosa och lignin. Under pyrolys, som kan översättas till värmedelning, bryts biomassan upp och flyktiga beståndsdelar som fukt och funktionella grupper frigörs i form ånga och gaser. Processen kräver en syrefri miljö där biomassan utsätts för värme under en viss

tid. Vid långsam pyrolys, som är den aktuella processen i detta projekt, används i regel en temperatur inom intervallet 500-700 °C under en uppehållstid på runt 15 min. Produkterna från pyrolysisprocessen är dels icke kondenserbara gaser, även känt som syntesgas, och kondenserbara gaser som vid kondensering bildar biooljor och tjära, det som återstår av biomassan är fast biokol (Weber och Quicker 2017).

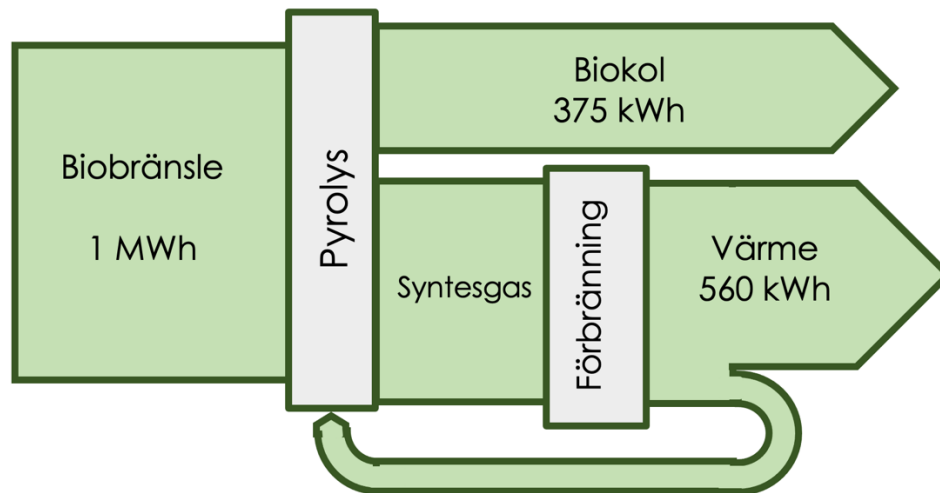
Massanalysen resulterade i att spån, flis och bark är biomassan som används inom detta projekt. Spån och flis har en låg andel aska och föroreningar vilket är gynnsamt, dock så kan dess höga fukthalt på 50 - 60 % och låga skrymdensitet innebära högre utsläpp vid transporter. Bark har en högre askhalt och även det har en hög fukthalt. Elementarsammansättningen av träflis hämtas från Bränslehandboken (Strömberg, Herstad 2012), processparametrar och sammansättningen hos producerad biokol hämtas från Azzi et al (2019) samt Åberg (2020) och sammanställs i Tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av bränsleegenskaper före och efter pyrolys, samt viktiga processparametrar.

Bränsleegenskaper Träflis	
Elementarsammansättning (C;H;O;N)	(51%; 6%; 41%; 0,05%)
Aska (vikt-% torrt)	0,7
Fukt (vikt-%)	44
Värmevärde (LHV) [MJ/kg]	19
Processparametrar	
Temperatur	700
Biokolsproduktion (andel av bränslets vikt-% torr)	21-36 %
Termisk verkningsgrad	0,56
Alfavärde	0,37
Bränsleegenskaper biokol	
Elementarsammansättning (C;H;O;N) (vikt-% torr)	(80%;2,0%;7,3%;0,008%)
Aska (vikt-% torrt)	1,0
C _{org} (vikt-% torr)	75
Värmevärde (HHV) [MJ/kg]	30

Hur stor andel av biomassan som blir omvandlad till biokol är avgörande för anläggningars lönsamhet och klimatpåverkan, en biokolsproduktion mellan 21-36 vikt-% torr används i Azzi et al (2019), vilket stärks av andra studier där en biokolsproduktion runt 30 vikt-% torr anges vid produktionstemperaturer från 500-800 °C (Weber och Quicker 2017). I fall då de önskade produkterna är biokol och värme kan bildningen av tjära och oljor undvikas genom att förhindra nedkylning av gaserna som bildas under pyrolysisprocessen innan förbränning av dessa sker för att producera värme (Pyreg 2021). En del av värmen som bildas vid förbränning av gaserna

krävs för att driva pyrolysisprocessen vidare. Figur 1 illustrerar energiflödet i ett system där långsam pyrolys av biobränsle används för produktion av biokol och värme.



Figur 1. Energiflödet i ett system med långsam pyrolys för produktion av biokol och värme.

2.3 Pyrolysteknikens mognadsgrad

En del i projektet är att undersöka omfattning och prestation på andra biokolsprojekt samt mognadsgraden hos tekniken att producera biokol genom långsam pyrolys. Detta avsnitt redovisar exempel på genomförda projekt samt en studie om pyrolysisreaktorer på marknaden.

2.3.1 Genomförda projekt i Sverige och Europa

Det senaste decenniet har det forskats intensivt inom produktion och användning biokol. Den första större studien i Sverige startade 2009 och har följts av flera pilotprojekt (Ecoera 2020). En studie om den europeiska marknaden för biokol visar på att det finns sammanlagt minst 80 biokolsproducenter i Sverige, Frankrike, Tyskland, Storbritannien, Schweiz och Italien. Trots det intensiva arbetet har tekniken ännu inte slagit igenom men studien visar att marknaden för biokol växer. Utöver producenter och kunder finns det samarbets- och översiktsorganisationer med etablerade standarder som "European Biochar Certificate" för hållbar produktion och standardiserad biokolskvalitet (Rest till Bäst 2019).

Ett exempel på en svensk anläggning är ett pilotprojekt i Hammenhög som producerar fjärrvärme till 60 kunder. Anläggningen sattes i drift 2018. Projektet har fått stöd från bland annat Naturvårdsverkets finansieringsprogram Klimatklivet som täckte 65 procent av investeringskostnaderna och projektets budget låg på 31 miljoner kronor (Bioenergitidningen 2017) Ett annat exempel är anläggningen som Stockholm Exergi har tillsammans med Stockholm Vatten och Avfall samt Stockholms Stad för biokolsproduktion av trädgårdsavfall i Högdalen (Stockholm Exergi 2020). Anläggningen producerar för närvarande fjärrvärme till 80 lägenheter men planen är att öka kapaciteten så det kan förse 400 lägenheter med fjärrvärme. En sådan anläggning skulle kompensera för utsläpp från ca 3500 bilar (Stockholm Vatten och

Avfall 2017). Anläggningens kostad uppgick till fyra miljoner SEK (Lundvall och Hellsten 2020).

2.3.2 Pyrolysysreaktorer på marknaden

Nedan följer en kort beskrivning av de modeller och anläggningar som jag fann i mina efterforskningar.

Pyreg, ett företag baserat i Tyskland tillverkar bland annat modellerna P500 Biomass och P1500 Biomass med termisk effekt på 150 kW respektive 750 kW. Anläggningarna producerar 1125 respektive 5625 MWh värme samt en biokolsproduktion på 190 respektive 530 ton per år. Anläggningarna kan köras 7500 h per år (Pyreg 2020).

Polvax-Ukraine, ett företag baserat i Ukraina som fokuserar på långsam pyrolysis av avfall, men vars reaktorer fungerar även för biomassa. Deras modeller CCom-1.5 och CCom-2.5 hanterar 1,5 respektive 2,5 ton bränsle i timmen och är bland de största systemen jag kom över i studien. Den termiska effekten för CCom-2.5 är runt 6,25 MW. Det finns begränsat med information om produktionsparametrar som temperatur och uppehållstid samt ingen beskrivning av det producerade biokolets egenskaper (Polvax-Ukraine 2020)

Beston, ett kinesiskt företag vars modeller i BST-serien hanterar 0,5-3 ton bränsle i timmen och har termisk effekt på 1,5 till 7,5 MW, även de bland de största anläggningarna jag fann. Priset på anläggningarna varierar från 58 000 till 128 000 USD beroende på storlek, med reservation för att priset på projekt har varierat mycket även på grund av andra faktorer (Beston 2020).

Compag, en tysk tillverkare vars modell CPP1500Biomass hanterar 400 till 600 kg bränsle i timmen och har termisk effekt på 550 kW. Anläggningen beräknas producera runt 600 ton biokol per år (Compag 2020).

GreenPower, en tillverkare från Bulgarien har flera produktlinjer, bland annat BIO-KILN med termisk effekt mellan 0,2-1 MW och biokolsproduktion på 30-120 ton per månad (GreenPower 2020a). Deras system Charcoal Kiln Continous har termisk effekt mellan 2,4-5,5 MW och producerar mellan 3800-12000 ton biokol per år (GreenPower 2020b).

Pacific Pyrolysis, verksamma i Australien där de driver en pilotanläggning som deras övriga modeller är baserade på. Anläggningarna kan varieras mellan 2-4 ton bränsle per timma och är bland de största produkterna på marknaden som jag kom över i min efterforskning (Downie 2011). Mig veterligen finns ännu ingen av dessa modeller installerade och då detta borde vara något de lyfter fram antas att det inte finns några anläggningar i drift. Det betyder nödvändigtvis inte att systemet inte levererar som utlovat.

Biomacon, en tysk tillverkare vars pyrolysanläggningar finns installerade på flera platser i Sverige. Deras anläggning för industriellt bruk har en termisk effekt i spannet 300-600 kW och hanterar 250 – 550 kg bränsle per timma (Biomacon 2018).

En sammanställning av de olika anläggningarnas egenskaper presenteras i Tabell 2 nedan.

Tabell 2. En sammanställning av olika pyrolysanläggningars biokolsproduktion samt produktion av värme alternativt värme och el.

Tillverkare / Modell	Förbrukning [MWh bränsle/år]	Effekt [MW]	Verkningsgrad	α -värde	Biokolsproduktion [kg/MWh bränsle]	Biokolsproduktion [ton/år]
Pyreg P 1500 Biomass	6000	0.75	0.5	-	88	530
Pyreg P 500 Biomass	1600	0.15	0.3	-	117	190
Polvax-Ukraine	54750	6.25	0.54	0.37	120	6570
Beston BST-05	10950	1.25	-	-	120	1314
Beston BST-30	65700	7.5	-	-	120	7884
Compag CPP1500Biomass	13140	0.55	0.46	0.22	46	600
GreenPower BIO-KILN 1	3500	0.45	0.72	-	137	480
GreenPower BIO-KILN 3	12000	1.4	0.72	-	120	1440
GreenPower KILN Continuous 1	21000	2.4	-	-	180	3810
GreenPower KILN Continuous 3	48290	5.5	-	-	250	12000
Pacific Pyrolysis PyroChar4000	87600	9	-	-	120	10500
Biomacron	12045	0.6	0.43	-	65	790

2.3.3 Exempel på kostnadskalkyl

I april 2020 publicerades förstudien *Biokol i Jönköping –för naturen, klimatet och människorna*, som undersöker förutsättningarna för en biokolsanläggning i Jönköping eller Gränna. I studiens kostnadskalkyl beaktades posterna; flis från stamved av gran, arbetskraft för kontinuerlig drift, el, administration, marknadsföring, myndighetskostnader och certifiering, avfallskostnad, avskrivning och räntor, underhåll och diverse. Avgörande för kostnaden av ett system är intäkterna från det producerade biokolet, studien använde ett pris på 10 kr per kg. Intäkterna från biokol stod för 90 procent och värmeproduktion stod för resterande intäkter (Lundvall och Hellsten 2020).

Kostnaderna för arbetskraft och driftskostnader varierar från 30 till 70 procent av bränslepriset där större anläggningar tycks ha bättre förutsättningar, de större anläggningarna har i sin tur högre investeringskostnad samt avskrivnings- och räntekostnader. Med en bränslekostnad på 200 kr per stjälp kubikmeter gav tre olika system följande årligt resultat;

- 150 kW_{th}: Intäkter: 1 940 000 kr. Kostnader: 1 899 641 kr. Resultat: 40 359 kr.
- 400 kW_{th}: Intäkter: 4 080 000 kr. Kostnader: 3 912 502 kr. Resultat: 166 499 kr.
- 670 kW_{th}: Intäkter: 8 800 000 kr. Kostnader: 8 191 607 kr. Resultat: 608 393 kr.

Eventuella bidrag togs ej i beaktning. Sammanlagt har tolv biokolsprojekt fått stöd genom klimatklivet sedan 2016 där stödet varierat mellan 40 till 65 % av investeringskostnaden (Lundvall och Hellsten 2020).

2.4 Användningsområden och marknad för biokol

2.4.1 Koldioxidinfångning och kompensering

Det är komplicerat att avgöra exakt hur stor klimatnytta biokol har kvantifierat i ton CO₂-eq/ton biokol då biokol kan användas på en rad olika sätt vilket leder till att klimatpåverkan varierar från fall till fall. Bortser man från eventuella bieffekter av biokolsanvändningen så är den stabiliserade mängden kol i biokolet enklare att uppskatta vilket leder till att klimatnyttan detta medför kan verifieras med större säkerhet. Biokol bryts inte ned i marken i samma takt som biomassa, runt 89 procent av kolatomerna i biokol producerad av trä är kvar efter 100 år (IPCC 2019). Tar man hänsyn till användningens effekter så varierar klimatpåverkan, i en studie angavs en variation från ca 1700 till 4900 kg CO₂-eq/ ton biokol (Azzi et.al 2019). Enligt en studie om den globala potentialen av biokol som jordförbättringsmedel kan metoden leda till negativa utsläpp på 1,8 Gt CO₂-eq per år utan att hota biologisk mångfald, stabilitet i ekosystemen eller matproduktion. Detta motsvarar runt 2,1 procent av de årliga antropogena utsläppen av växthusgaser (Woolf et.al. 2010).

Det finns flera mekanismer och marknader för minskning av utsläpp, men endast 20 procent av de globala växthusgasutsläppen omfattas av den nuvarande marknaden. Det finns ännu inga officiella system för handel med utsläppscertifikat genom biokolsproduktion. Tillsvidare finns det exempel på frivilliga handelsinitiativ för biokol som kolsänka. Detta kan komma att ändras när nya regler träder i kraft då Kyotoprotokollet ersätts med Parisavtalet, där förändringarna i handelssystemet genom Artikel 6 kommer leda till att en större del av utsläppen omfattas av större offentliga handelssystem, kanske även biokolsproduktion (Rest till Bäst 2019). Om så blir fallet kan handel ske inom t.ex. EU ETS där priset under vecka 45 år 2020 låg på 23,67 EUR/ ton CO₂-eq (Energimyndigheten 2020).

2.4.2 Biokolsmarknad

Det användningsområde för biokol som ofta lyfts fram är jordförbättringsmedel, biokol har dock fler användningsområden än så, något som redovisas i detta avsnitt. Först kommer dock en mer ingående beskrivning kring potentialen som just jordförbättringsmedel.

Då biokol är tänkt att användas som jordförbättringsmedel finns det europeiska standarder att förhålla sig till, vilket de flesta som säljer biokol på den svenska marknaden gör (EBC 2020). Biokol har hög katjonutbyteskapacitet vilket innebär att näringsämnen bli mer lättillgängliga för växter. Detta leder till att mindre tillförsel av näring krävs, alltså minskat behov för konstgödsel, samt minskad avrinning. Den porösa strukturen hos biokol leder till ökad vattenhållande förmåga, vilket gör marken mer motståndskraftig vid torka. Effekterna varierar beroende på jordmån, där sandiga jordmån drar mest nytta av biokolsanvändning (Weber och Quicker 2017). Ecoera, konsulter inom biokolsproduktion, utförde de första storskaliga pilotprojekten i Sverige 2009. Sandig jordmån såg den största påverkan med en 33 procent ökning på skörden både 2010 och 2011 jämfört med referensvärdet vid en applicering med runt 3 kg biokol per m². Användning vid tomatodling i kruka visade på en 39 procent ökning av skörden (Ecoera 2020). Enligt en studie om potentiell efterfrågan på biokol från svenskt jordbruk uppskattas aktiv åkerareal med sandjord på knappa 900 000 hektar kunna efterfråga runt 26 miljoner ton biokol per applikation (Rest till Bäst 2019). Vid uppskattning av

volympotentialen för biokol antas applicering ske en gång per 20 år. I Jönköpings län uppskattas runt 37 400 hektar jordbruksmark vara lämplig för applikation av biokol (Osslund 2020). Vid applicering av 3 kg biokol per m² en gång per 20 år medför detta en total efterfrågan på runt 1 120 000 ton biokol i Jönköpings län, vilket motsvarar en produktion på runt 56 000 ton biokol per år.

Biokol har också blivit allt vanligare att blanda i som komponent i stadsplanteringsjordar (Stockholm Vatten och Avfall 2020). Det är även en komponent i gröna fasader och takplanteringar (Veg Tech 2020). Utöver egenskaper som jordförbättringsmedel har tillsatser av biokol i djurfoder visat på en drastisk minskning av utsläpp kopplade till nötkreaturs hälsa, metabolism och metangasutsläpp. Tester visar också att inbladning av biokol i avföringsslurrys till en halt på 13 procent innan användning som gödsel minskar ammoniakutsläppen med 77 procent, lustgasutsläppen med 63 procent och metangasutsläppen med 100 procent jämfört med gödsling med bara djurspillning (Schmidt et al 2019). Biokol har också användningsområden inom bygg, konstruktion och metallurgi (GreenPower 2020c).

Priset på biokol är avgörande för kostnadskalkylen, där priset på biokol från en existerande pyrolysanläggning i Sverige ger en indikation om priset. Försäljning av biokol sker i det fallet via trädgårdssäck. Det tidigare nämnda projektet i Hammenhög som producerar värme till 60 hushåll drivs av Skånefrö som säljer laddat biokol i säckar av varierande storlek. Priset på den näst minsta säcken på 15 liter är 270 kr medan priset på den största säcken på 2400 liter är 11 815 kr (Skånefrö 2020). Biokolet är EBC-certifierat och laddat vilket skulle kunna bidra till ett högre pris. Med en densitet på runt 300 kg/m³ (Weber et.al 2017) väger biokolet i den minsta säcken 4,5 kg och priset är 60 kr/kg, den största säcken väger 720 kg och priset är 16 kr/kg. En rapport från Avfall Sverige presenterar ett pris på runt 3 kr/kg för biokol (Åberg 2020), vilket ej stämmer överens med priset på den största säcken från Skånefrö. Kostnaden för laddning av biokolet kan ligga till grund för att priset på biokol antogs vara 10 kr/kg i förstudien om pyrolysanläggning i Jönköping (Lundvall och Hellsten 2020).

2.5 Lokal data från Eksjö

I detta avsnitt redovisas insamlade data från de sågverk i Eksjö kommun som gett uppgifter om dess befintliga restprodukter samt en kort beskrivning av det befintliga fjärrvärmenätet i Eksjö.

2.5.1 Massanalyt

En undersökning av tillgänglig biomassa i form av biprodukter från sågverk belägna i Eksjö kommun genomfördes. Dataunderlaget erhöles via korrespondens, för detaljerad information se bilaga A. För att kunna användas i modellen, som beskrivs i 2.4, skall energiinnehållet i fraktionerna som är aktuella att använda inom projektets ramar beräknas. Bränslets densitet slås upp i bränslehandboken (Strömberg, Herstad 2012) och dess värmevärde hämtas från Energimyndigheten (Energimyndigheten 2017).

Den största delen av sågverkens biprodukter är cellulosaflis vilket går till massa – och pappersindustrin vilket utesluter detta som bränsle. Resultatet av inventeringen för övriga bränslen presenteras i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Sammanställning av tillgänglig biomassa och dess energiinnehåll. Källa: [1] (Energimyndigheten 2017), [2] (Strömberg och Herstad 2012).

<i>Bränsle</i>	<i>Indata</i>	<i>Omvandlingsfaktor</i>	<i>Energiinnehåll [MWh]</i>	<i>Massa [ton]</i>
Bark	100 000 [m ³]	0,6 [MWh/m ³] [1]	60 000	55 000 [2]
Sågspån	140 000 [m ³]	0,75 [MWh/m ³] [1]	105 000	49 000 [2]
Kutterspån	19 000 [ton]	2,14 [MWh /ton] [1][2]	41 000	19 000 [2]
Torrflis	15 000 [m ³]	0,75[MWh/m ³] [1]	11 250	5 250 [2]
Bark, spån och torrflis	54 [GWh]	1000	54 000	18 900 [2]

Samtliga biprodukter har befintliga användningsområden, där de förutom direkt energiproduktion går till bland annat stallströ, pellets och spånskivor.

2.5.2 Befintligt Fjärrvärmesystem och Energibehov

Eksjö Energi driver tre separata fjärrvärmenät i Eksjö kommun där det största ligger i Eksjö tätort och två mindre i tätorterna Mariannelund och Ingatorp. Fjärrvärmeverket i Eksjö producerade runt 130 GWh värme och 16 GWh el år 2019. Systemet består av tre flispannor med 10 MW, 7 MW och 6 MW effekt, en kraftvärmepanna med 18 MW effekt för energiåtervinning av avfall, en RME eldad spetslastpanna på 10 MW samt 1 MW spillvärme från industri. Produktionsanläggningarna i Mariannelund och Ingatorp består enbart av värmepannor. Anläggningen i Mariannelund producerade runt 16,5 GWh värme år 2019 och består av tre fastbränslepannor på sammanlagt 3 MW, 1,5 MW och 1 MW samt två pannor med HVO som bränsle för spetslast på 2 MW och 3 MW. Anläggningen i Ingatorp producerade 3,7 GWh värme år 2019 och består av en flispanna på 1 MW och en oljepanna med HVO för spetslast med 2 MW effekt (Eksjö Energi 2020).

3. Metod

3.1 Modellering av Fjärrvärmenät

3.1.1 Beskrivning av simuleringsmodell

För att simulera vad som sker med energiproduktionen i fjärrvärmenätet vid implementering av en pyrolyysreaktor används en modell framtagen av forskare på institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik vid Uppsala universitet. Modellen använder en s.k. fixed model structure (FMS) och används i programmet MATLAB. Kortfattat är modellen framtagen för att kunna simulera ett godtyckligt fjärrvärmesystem med hjälp av ett fåtal inparametrar och använder sig av linjärprogrammering för att kostnadsoptimera produktionen i systemet (Åberg & Widen 2013).

För att simulera fjärrvärmenätet i Eksjö kommun med modellen behövs först och främst information om produktionsanläggningarna som producerar fjärrvärmen i systemet. Närmare bestäms anläggningarnas termiska effekt, verkningsgrad samt eventuellt alfavärde. Underlag om pannor och dess produktionsparametrar erhöles från fjärrvärmeproducenten Eksjö Energi. Modellen är begränsad i antal pannor som kan simuleras samtidigt och en sammanslagning av pannor med samma typ av produktion och bränsle är nödvändig. De tre flispannorna i Eksjös fjärrvärmenät kommer alltså representeras av en panna med en effekt på 23 MW.

Modellen gör inga prognoser om hur fjärrvärmeproduktionen kommer se ut i framtiden utan simulerar hur fjärrvärmeproduktionen har sett ut eller hade kunnat se ut under andra omständigheter, t.ex. med en annan konfiguration av produktionsanläggningar. Värmebehovet baseras på föregående års totala värmeproduktion samt temperaturdata, där data från Jönköping som ligger 60 km från Eksjö används. Tidigare års värmeproduktion avgör hur mycket fjärrvärme som produceras på årsbasis och temperaturdata avgör lastprofilens utformning på timbasis.

För att genomföra kostnadsoptimeringen av fjärrvärmeproduktionen behöver modellen även information om priset på bränsle för respektive panna samt priset på den el som konsumeras alternativt produceras. Priset på bränsle antas vara fast och priserna som används för simuleringarna presenteras i Tabell 4. Enligt fjärrvärmeproducenten ligger bränslepriset för flis mellan 185–195 kr per MWh, medan energimyndigheten anger ett pris på 200 kr per MWh biobränsle (Energimyndigheten 2020a). Priset på eldningsolja är runt 1000 kr/MWh olja enligt Eksjö Energi, där oljan som eldas i Eksjö är RME, HVO används i Ingatorp och Mariannelund. Fjärrvärmeproducenter tar betalt för det avfall de tar emot, enligt ett pris som angavs av Eksjö Energi samt ett tillägg för nya skatter antas priset för bränslet vara -200 kr/MWh avfall. I simuleringarna används 2019 års elprisprofil från spotpriset på Nord Pool Spot samt den aktuella energiskatten på el som enligt Skatteverket är 353 SEK per MWh el (Skatteverket, 2020).

Kostnadsoptimeringen av fjärrvärmeproduktionen sker på timbasis och modellen väljer automatiskt den kombination av produktionsanläggningar som tillgodoser värmebehovet med lägst produktionskostnad. Modellen tillgodoser alltid värmebehovet under den aktuella timmen medan eventuell elproduktion från kraftvärmeanläggningar varierar beroende lönsamhet baserat på det aktuella elpriset. Efter en simulering presenterar modellen information om systemets totala produktionskostnad på årsbasis, data för bränsleförbrukning hos respektive

panna samt el-och värmeproduktion från respektive panna. Med produktionskostnader avses kostnaden för fjärrvärmeproduktionen, inkomster från eventuell elproduktion från kraftvärmeanläggningar dras av från produktionskostnaden. Kostnader för underhåll och drift tas ej med i beräkningarna, inte heller kapitalkostnader för investeringar.

3.1.2 Simulering av BCE-anläggning

För att priset på fjärrvärmeproduktionen från BCE-anläggningarna ska bli representativt behöver intäkterna som försäljning av biokol och utsläppscertifikat genererar dras av från priset på det ingående biobränslet för att modellen ska kunna ta hänsyn till dessa. De retroaktiva intäkterna tas alltså med i beräkningarna för priset på bränslet som används.

Uppskattningen av det korrigerade bränslepriset utgår från det ursprungliga priset på det ingående bränslet, vilket antas vara samma som för det biobränsle som förbränns i de befintliga biobränsleeldade värme pannorna, alltså 200 kr/MWh bränsle.

Intäkterna från försäljning av biokol uppskattas genom att beräkna hur mycket biokol som produceras av BCE-anläggningarna per MWh bränsle och sedan multiplicera detta med priset för biokol.

Med beteckningarna

- ρ_{vol} - bränslets skrymdensitet [kg/m^3]
- ρ_{energi} - bränslets energidensitet [MWh/m^3]
- η - andelen ingående bränsle som omvandlas till biokol
- β - biokolsproduktion [kg/MWh biobränsle]

Beräknas biokolsproduktionen uttryckt i kg per MWh biobränsle med formeln;

$$\beta = \left(\frac{\rho_{vol}}{\rho_{energi}} \right) \eta$$

Torkat biobränsle antas ha en skrymdensitet på 200 kg/m^3 (Strömberg och Herstad 2012). En bränsleblandning av spån, flis och bark antas ha en energidensitet på $0,75 \text{ MWh/m}^3$ (Energimyndigheten 2017). Biokolsproduktionen i BCE-anläggningarna antas vara 26,5 % vilket är strax under mitten av produktionsintervallet 21–36 % av det ingående bränslets torrsvikt. Den beräknade biokolsproduktionen blir således runt 70 kg biokol per MWh biobränsle. Intäkt från försäljning av biokol antas vara 3 kr per kg biokol (Åberg 2020), vilket motsvarar en intäkt på 210 kr per MWh biobränsle som används.

Det finns ett även ett ekonomiskt värde i den infångade koldioxiden om man väljer att sälja utsläppscertifikat på klimatkompensationsmarknaden. Priset på 1 ton $\text{CO}_2\text{-eq}$ inom EU ETS varierar, priset som används i dessa beräkningar hämtades vecka 45 år 2020 då priset låg på 23,67 EUR/ton vilket motsvarar en intäkt på runt 30 kr/MWh biobränsle (Energimyndigheten 2020b).

Sammantaget uppskattas intäkterna från biokolsproduktionen vara 240 kr/MWh-bränsle som används i BCE-anläggningarna och det korrigerade bränslepriset för att producera biokol beräknas således till -40 kr/MWh-bränsle. Intäkterna från försäljning av biokol samt

utsläppsrätter antas vara större än priset för bränslet, något som kommer diskuteras och vars inverkan på systemet undersöks i en känslighetsanalys som beskrivs närmare i ett senare stycke. Tabell 4 visar en sammanställning av de priser som används vid simuleringarna av fjärrvärmeproduktionen.

Tabell 4. Bränslepriser som används i modellen.

Bränsle	Pris [kr/MWh bränsle]
Biobränsle	200
Olja	1000
Avfall	-200
Biobränsle till pyrolys	-40

3.1.3 Beskrivning av scenarier

De befintliga fjärrvärmesystemen används som referensscenario för respektive system. De parametrar som används för att representera de befintliga fjärrvärmenäten i modellen presenteras i tabell 5 nedan.

Tabell 5. Produktionsparametrar som används i modellen för referensscenarion. Förkortningarna HO och CHP står för värmeproduktion respektive kraftvärmeproduktion, förkortningarna O, BB och A indikerar vilket bränsle som används i respektive panna och står för olja, biobränsle respektive avfall.

Inparametrar FMS	Mariannelund Ref	Ingatorp Ref	Eksjö Ref
Installerad Termisk Effekt HO O [MW]	5	2	20
Installerad Termisk Effekt HO BB [MW]	5,5	1	23
Installerad Termisk Effekt CHP A [MW]	-	-	18
α - CHP A	-	-	0,15
Verkningsgrad HO F	0,85	0,85	0,85
Verkningsgrad HO BB	0,9	0,9	0,9
Verkningsgrad CHP A	-	-	0,95
Q [GWh/år]	16,5	3,7	130

För att studera effekten av implementeringen av BCE-anläggningar definieras olika scenarier där anläggningarnas effekt varieras. BCE-anläggningarna antas ha en termisk verkningsgrad på 56 %. Då BCE-anläggningen producerar kraftvärme antas dessa ha ett alfa-värde på 0,37.

För fjärrvärmesystemet i Mariannelund används två scenarier utöver referensscenariot;

- **Mariannelund 1**, alla fastbränslepannor byts ut mot pyrolysreaktorer med kraftvärmeproduktion.
- **Mariannelund 2**, pyrolysreaktorer som täcker baslasteffekten på 500 kW med värme och elproduktion installeras.

För fjärrvärmesystemet i Ingatorp används även här två scenarier utöver referensscenariot;

- **Ingatorp 1**, fastbränslepannan byts ut mot pyrolysreaktor med kraftvärmeproduktion.
- **Ingatorp 2**, en pyrolysreaktor som täcker baslasteffekten på 110 kW installeras.

Implementering av BCE-anläggningar i fjärrvärmesystemet i Eksjö undersöks med 4 olika scenarier;

- **Eksjö 1**, en pyrolysreaktor på 10 MW termisk effekt samt elproduktion ansluts till befintligt fjärrvärmenät.
- **Eksjö 2**, en pyrolysreaktor på 10 MW termisk effekt ansluts till befintligt fjärrvärmenät.
- **Eksjö 3**, en pyrolysreaktor på 10 MW termisk effekt samt elproduktion ansluts till befintligt fjärrvärmenät samtidigt som priset korrigeras så pyrolysreaktorn producerar baslast.
- **Eksjö 4**, en pyrolysreaktor på 10 MW termisk effekt ansluts till befintligt fjärrvärmenät samtidigt som priset korrigeras så pyrolysreaktorn producerar baslast.

Scenarierna Mariannelund 1 och Ingatorp 1 valdes dels för att undersöka om BCE-anläggningar kan vara ett ekonomiskt försvarbart alternativ till biobränsleeldade värmepannor om någon av dessa skulle bytas ut. En annan anledning är att uppskatta den maximala potentialen att generera netto-negativa utsläpp av växthusgaser genom fjärrvärmeproduktion med BCE-anläggningar i dessa nät.

Baslasteffekten som används i Mariannelund 2 och Ingatorp 2 fås genom simuleringen av referensscenario för respektive fjärrvärmesystem. Anledningen till att dessa scenarier undersöks är att baslastanläggningar har flest drifttimmar och därför antas vara de mest lönsamma investeringarna samt producera mest biokol och således generera mest netto-negativa utsläpp av växthusgaser per installerad effekt.

Scenarierna Eksjö 1 och Eksjö 2 valdes för att se om en större anläggning i Eksjö genererar mer eller mindre netto-negativa utsläpp av växthusgaser jämfört med anläggningarna i de mindre fjärrvärmenäten. Scenarierna Eksjö 1 och Eksjö 2 kan betraktas som en i dagsläget mer aktuell undersökning om BCE-anläggningars eventuella roll i fjärrvärmeproduktionen där kostnadsoptimering av fjärrvärmeproduktionen prioriteras. Scenarierna Eksjö 3 och Eksjö 4 kan betraktas som en undersökning om samma BCE-anläggningars maximala potential att generera netto-negativa utsläpp av växthusgaser om detta är något som kommer premieras i framtiden oavsett kostnad.

En sammanställning av de parametrar som används av modellen för att representera fjärrvärmenäten i framtagna scenarion presenteras i tabell 6 nedan.

Tabell 6. Produktionsparametrar vid simulering av respektive scenario. Förkortningarna HO och CHP står för värmeproduktion respektive kraftvärmeproduktion, förkortningarna O, BB, och A indikerar vilket bränsle som används i respektive panna och står för olja, biobränsle, respektive avfall. Förkortningarna M1 och M2 står för scenarierna Mariannelund 1 respektive Mariannelund 2, I1 och I2 står för scenarierna Ingatorp 1 respektive Ingatorp 2.

Inparametrar FMS	M1	M2	I1	I2	Eksjö 1	Eksjö 2	Eksjö 3	Eksjö 4
Installerad Termisk Effekt HO O [MW]	5	5	2	2	20	20	20	20
Installerad Termisk Effekt HO BB [MW]	5,5	5,5	1	1	23	23	23	23
Installerad Termisk Effekt HO BCE [MW]	-	-	-	-	-	10	-	10
Installerad Termisk Effekt CHP BCE [MW]	5,5	0,5	1	0,11	10	-	10	-
Installerad Termisk Effekt CHP A [MW]	-	-	-	-	18	18	18	18
α - CHP BK	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	-	0,37	-
α - CHP A	-	-	-	-	0,15	0,15	0,15	0,15
Verkningsgrad HO O	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Verkningsgrad HO BB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Verkningsgrad HO BCE	-	-	-	-	-	0,56	-	0,56
Verkningsgrad CHP BCE	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	-	0,56	-
Verkningsgrad CHP A	-	-	-	-	0,95	0,95	0,95	0,95
Q [GWh/år]	16,5	16,5	3,7	3,7	130	130	130	130

3.2 Beräkning av klimatpåverkan

För att beräkna klimatpåverkan används utsläppsfaktorer som representerar utsläppen av CO₂-eq per MWh-bränsle som används. Utsläppsfaktorerna för olja, biobränsle, avfall samt el hämtas från Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2020).

Beräkningen av utsläppsfaktorn för biokol utgår ifrån dess elementarsammansättning där kol utgör 80 % av vikten på biokolet, se tabell 1, samt att nedbrytningen av biokolet sker i en takt där att runt 90 % av kolatomerna antas vara bundet i biokolet efter 100 år. Detta resulterar i att kol som är stabilt bundet i biokolet utgör 75 % av dess vikt. Kol har en molmassa på 12 g/mol och syre har en molmassa på 16 g/mol, CO₂ har således en molmassa på 44 g/mol där kolatomen utgör 27,3 % av dess vikt. Genom att dividera vikten hos stabilt bundna kolatomer i ett kg biokol, 750 g, med kolatomens vikt-% av CO₂ beräknas ett kg biokol binda 2,75 kg CO₂-eq i minst 100 år. Detta uppskattas vara biokolets klimatpåverkan om man bortser från effekter vid användningen av biokolet förutsatt att det inte förbränns.

Vid en biokolsproduktion på 70 kg biokol per MWh biobränsle som används i BCE-anläggningen medför detta en utsläppsfaktor för biokol på -192,5 kg CO₂-eq per MWh bränsle. Tabell 7 visar en sammanställning av de utsläppsfaktorer som används i beräkningarna av fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan. Anledningen till att el har en negativ utsläppsfaktor är att det är fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan som undersöks. Den el som produceras i samband med fjärrvärmeproduktionen bidrar med negativa utsläpp då denna elproduktion antas ersätta annan elproduktion med motsvarande utsläppsfaktor.

Tabell 7. Utsläppsfaktorer för de olika bränslena

Bränsle	Utsläppsfaktor [kg CO ₂ -eq / MWh]
Olja	288
Biobränsle	5,8
Avfall	144
El	-125
Biobränsle till pyrolys	-192,5

Simuleringarna ger data för hur mycket bränsle som används i de olika anläggningarna samt hur mycket el som produceras vid respektive scenario. Fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan beräknas genom att multiplicera elproduktionen och förbrukningen av de olika bränslena med respektive utsläppsfaktor för att sedan summera ihop klimatpåverkan från alla anläggningar.

3.3 Känslighetsanalys

Då priset på biokol har stor betydelse för produktionsmixen i systemet görs en känslighetsanalys på scenario Eksjö 1 där priset på biokol ökas respektive sänks med 1,5 kr per kg biokol, alltså 50 procent av nuvarande kostnad. Priset på biobränsle som används i BCE-anläggningarna ändras vid simuleringarna under känslighetsanalysen. Biokolsproduktionen per MWh bränsle som används i BCE-anläggningarna antas vara oförändrat.

När försäljningspriset på biokol är 3 kr/kg är intäkterna från biokolförsäljning 210 kr per MWh bränsle. När försäljningspriset på biokol ändras med 1,5 kr/kg medför det att intäkterna som dras av från det ursprungliga bränslepriset ändras med 105 kr per MWh bränsle. Då biokolsproduktionen är oförändrad antas intäkterna från utsläppscertifikat vara konstant. Det korrigerade bränslepriset som används under känslighetsanalysen blir således 65 kr MWh / bränsle vid en reduktion av biokolspris respektive -145 kr MWh / bränsle vid ett ökat försäljningspris för biokol. Fjärrvärmeproduktionens resulterande produktionskostnad samt klimatpåverkan undersöks.

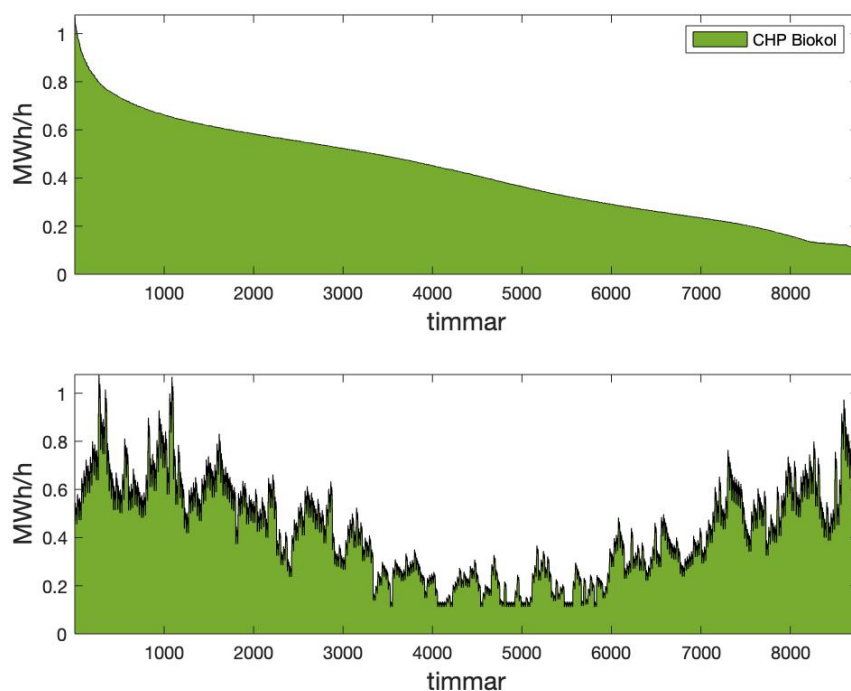
Systemens klimatpåverkan beräknas genom de utsläppsfaktorer som används, där hur produktionen av el viktas kan diskuteras. En del beräkningar utgår ifrån en utsläppsfaktor på 1000 kg CO₂-eq / MWh för el, vilket delvis kan förklaras av en generellt hög andel fossilbaserad elproduktion på den europeiska elmarknaden. Därför undersöks även hur den förändrade elproduktionen i systemet påverkar dess klimatpåverkan vid implementering av BCE-anläggningar vid olika viktning av elproduktionens utsläppsfaktor.

4. Resultat

Inledande förtydligande av resultatet; produktionskostnaderna som presenteras avser kostnaden för fjärrvärmeproduktionen, inkomster från eventuell elproduktion från kraftvärmeanläggningar dras av från produktionskostnaden. Kostnader för underhåll och drift tas ej med i beräkningarna, inte heller kapitalkostnader för investeringar.

4.1 Ingatorp och Mariannelund

Resultatet från simuleringarna av fjärrvärmenätet i Ingatorp tyder på en minskning i produktionskostnad vid implementering av pyrolysisreaktorer. Enligt simuleringarna krävs ingen förbränning av olja för att täcka effekttoppar i systemet, något som kan tyda på en viss diskrepans mellan simuleringsresultat och verklighet. Användningen av olja i systemen har varit låg de senaste åren och att ingen olja krävs medför inte nödvändigtvis att resultatet är orimligt. Figur 2 nedan visar varaktighetsdiagrammet för scenario Ingatorp 1, vilket ser identiskt ut med referenssystemet bortsett från att fjärrvärmen då produceras av biobränsleeldade värmepannor.

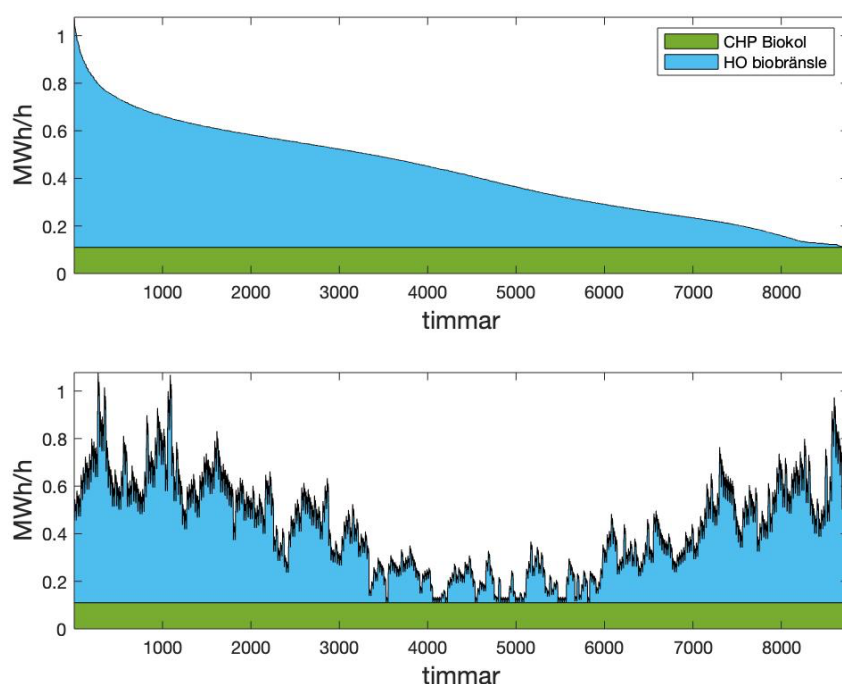


Figur 2: Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Ingatorp 1.

En avgörande faktor för produktionskostnaden är huruvida pyrolysisreaktorn producerar både el och värme eller enbart värme. Resultatet av simuleringarna visar på att produktionskostnaden i referensfallet var runt 807 000 SEK, medan produktionskostnaden sjönk till -265 000 SEK och -943 000 SEK för värme respektive el- och värmeproduktion när all värme producerades av pyrolysanläggningen som i scenario Ingatorp 1. Den negativa produktionskostnaden är dels en följd av de intäkter försäljningen av biokol genererar och dels intäkter från elproduktionen. Förbrukningen av biobränsle i Ingatorp 1 ökar från runt 4130 MWh bränsle till 9100 MWh bränsle per år, alltså mer än en fördubbling. Om pyrolysanläggningen inte producerar el utan all energi omvandlas till värme krävs mindre bränsle, där en anläggning som bara producerar biokol och värme förbrukar 6600 MWh bränsle per år. Biokolsproduktionen varierar således

från 462 till 637 ton biokol per år beroende på typ av reaktor, vilket med ett pris på 3 kr per kg motsvarar en försäljning på 1 386 000 till 1 911 000 SEK per år.

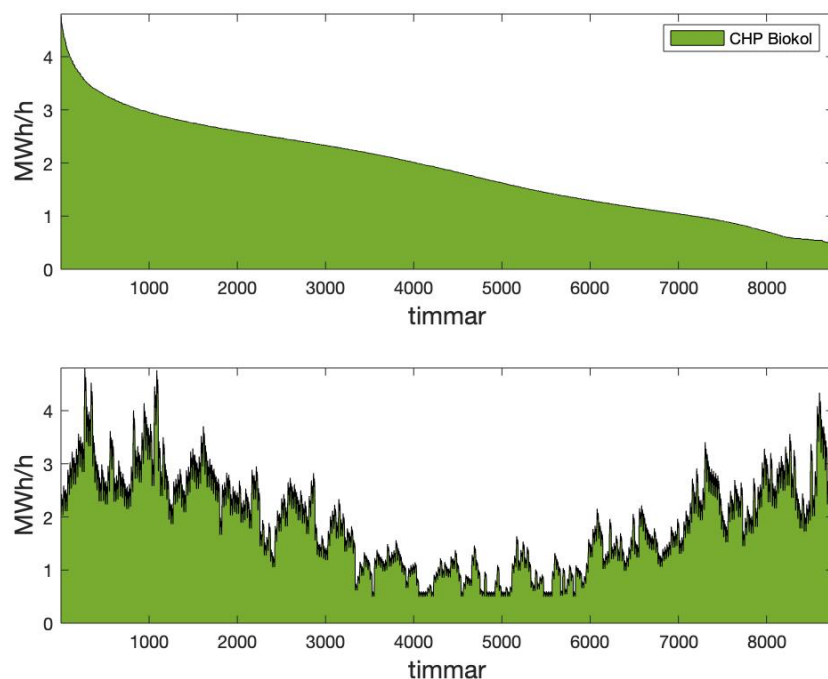
Genom granskning av lastfördelningen i Figur 2 identifieras baslasteffekten och ger dimensioneringen av pyrolysanläggningen för scenario Ingatorp 2, där baslastanläggningens optimala installerade effekt är 110 kW. I scenario Ingatorp 2, vars varaktighetsdiagram presenteras i figur 3 nedan, täcks den identifierade baslasten av en pyrolyreaktor som producerar biokol, värme och el.



Figur 3. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Ingatorp 2.

Resultatet visar att en pyrolyreaktor som täcker baslasteffekten i Ingatorp producerar runt 964 MWh värme och 357 MWh el per år, den totala biobränsleanvändningen för systemet blir 5420 MWh biobränsle, där 2360 MWh biobränsle går till pyrolys. Resultatet av simuleringen visar en produktionskostnad på 359 000 SEK, en minskning med 448 000 SEK jämfört med referensscenariot. Produktionen av biokol blir runt 165 ton per år, vilket motsvarar en försäljning på runt 495 000 SEK per år.

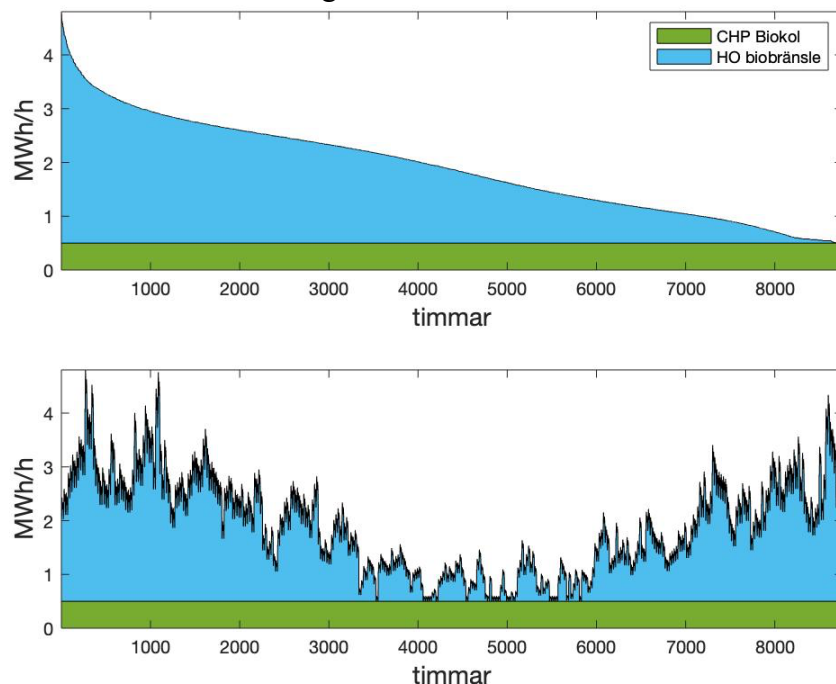
Resultatet från simuleringarna av fjärrvärmenätet i Mariannelund följer som väntat samma mönster som de av Ingatorps fjärrvärmenät. Referenssystemet hade en produktionskostnad på 3 593 000 SEK per år och en biobränsleförbrukning på 18 428 MWh bränsle per år vilket medför utsläpp på runt 107 ton CO₂-eq per år. Enligt simuleringarna användes ingen HVO olja för att täcka effekttoppar vilket innebär att varaktighetsdiagrammet för referenssystemet är identiskt med det för scenario Mariannelund 1, som presenteras i figur 4 nedan.



Figur 4. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Mariannelund 1.

Simuleringen av scenario Mariannelund 1 visar återigen att pyrolys med produktion av biokol, värme och el har lägre produktionskostnader jämfört med bibränsleeldad värmepanna. Mängden förbrukat bibränsle ökar till 40 574 MWh bränsle per år. Produktionskostnaden för systemet beräknas bli - 4 211 000 SEK per år och biokolsproduktionen runt 2840 ton per år.

Genom granskning av lastfördelningen i Figur 4 identifieras den optimala installerade effekten av baslastanläggningen i Mariannelund 2 till 500 kW. Varaktighetsdiagrammet för scenario Mariannelund 2 visas i figur 5 nedan.



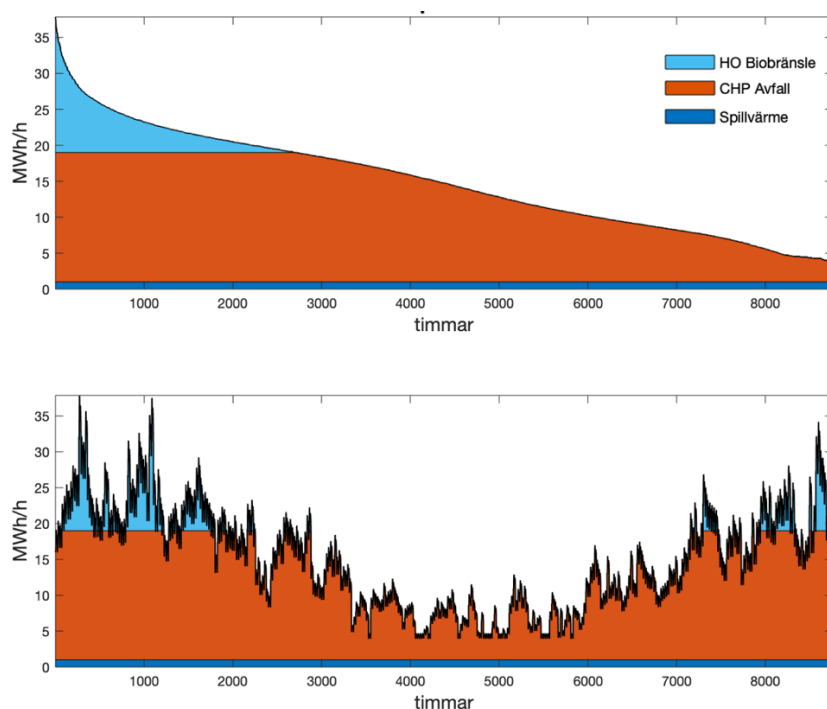
Figur 5. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Mariannelund 2.

En pyrolysreaktor med en effekt på 500 kW som täcker baslasten i Mariannelunds fjärrvärmenät skulle enligt simuleringarna producera 750 ton biokol per år. Produktionskostnaden för systemet blir enligt resultatet 1 632 000 SEK per år, förbrukningen av biobränsle ökar med 6000 MWh jämfört med referensscenariot.

Resultatet från simuleringarna av Ingatorps och Mariannelunds fjärrvärmenät visar att en pyrolysanläggning har lägre produktionskostnad än en biobränsleeldad värmepanna oavsett om anläggningen producerar el och värme eller enbart värme. Om biokolsproduktion skulle täcka baslasten av värmebehovet i Ingatorp och Mariannelund skulle det generera netto negativa utsläpp på runt 450 ton CO₂-eq respektive 2060 ton CO₂-eq per år. Pyrolysreaktorerna i Ingatorp 2 och Mariannelund 2 producerar 1 respektive 4,4 GWh värme per år samt 0,36 respektive 1,6 GWh el per år.

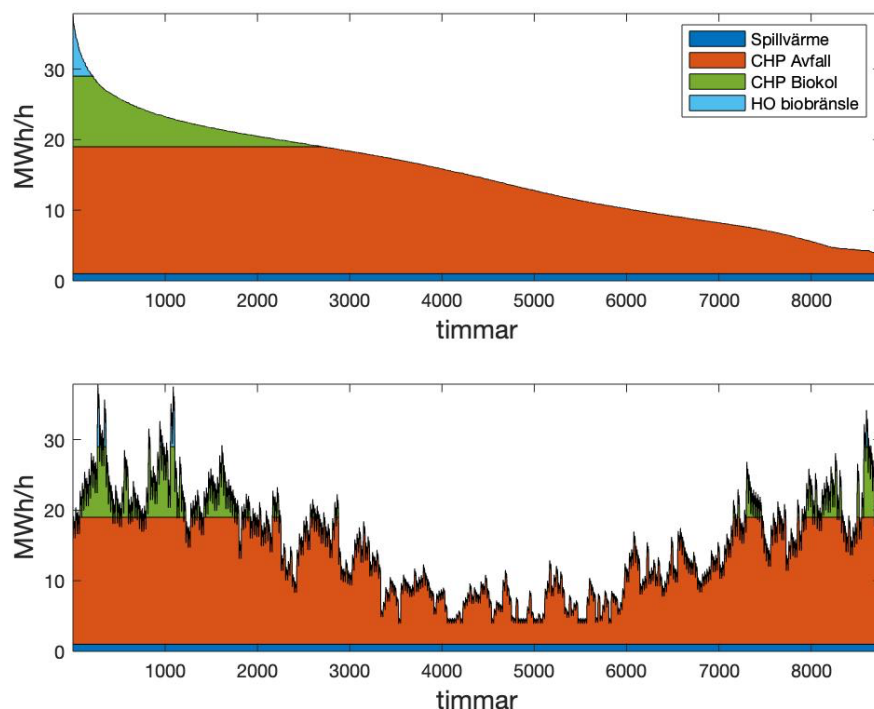
4.2 Eksjö

Även resultatet från simuleringarna av fjärrvärmenätet i Eksjö tyder på att ingen olja används för att täcka effekttoppar som uppstår. Figur 6 nedan visar varaktighetsdiagrammet för fjärrvärmeproduktionen vid Eksjö referensscenario. Systemet har en total produktionskostnad på -31 510 000 SEK per år och biobränsleförbrukningen är 12 300 MWh bränsle per år. Avfallsförbränning står för den största delen av produktionen där drygt 134 000 MWh avfall energiåtervinns varje år vilket genererar utsläpp av växthusgaser motsvarande runt 19 300 ton CO₂-eq per år, med det negativa bidraget från elproduktionen blir fjärrvärmeproduktionens totala klimatpåverkan runt 17 000 ton CO₂-eq per år.



Figur 6. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid referensscenario för Eksjö.

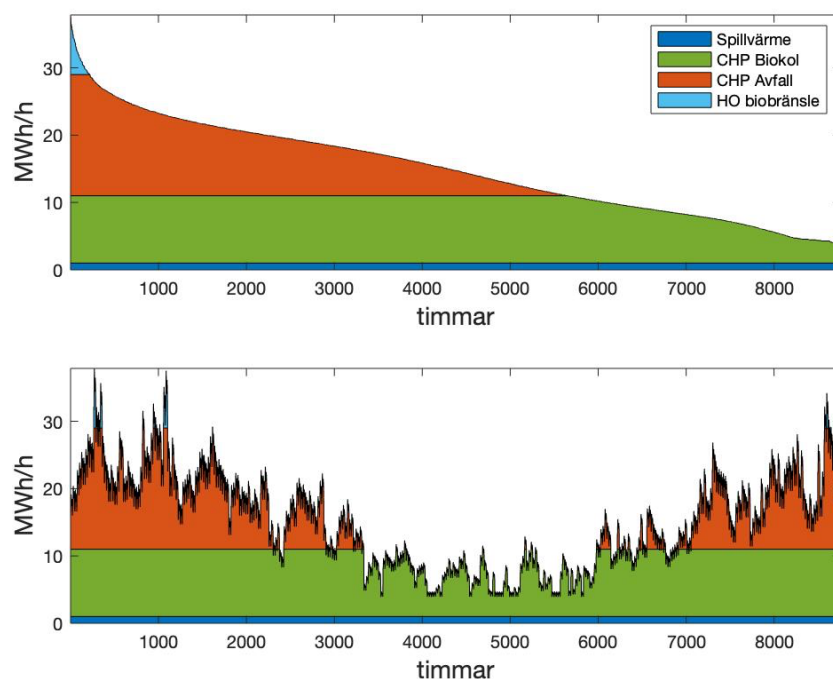
Produktionsmixen i scenario Eksjö 1 visas i Figur 7 nedan. Kraftvärmeproduktion av avfall är baslast i systemet, biokolsproduktion prioriteras högre än de biobränsleeldade värmepannorna. Enligt simuleringarna är drifttiden för pyrolysreaktorn runt 2700 timmar om året vilket innebär en låg utnyttjandegrad.



Figur 7. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Eksjö 1.

I scenario Eksjö 1 är produktionskostnaden -36 490 000 SEK per år och användningen av biobränsle har ökat till 26 400 MWh biobränsle per år. Biokolsproduktionen är 1850 ton per år, anläggningen producerar 10,8 GWh värme och 4 GWh el per år. För att uppskatta effekten av den lägre utnyttjandegraden kan biokolsproduktionen per installerad effekt på pyrolysanläggningen jämföras mellan scenario Eksjö 1 och systemen som producerar baslast i Mariannelund 2 och Ingatorp 2. I scenario Eksjö 1 är resultatet 185 ton biokol per MW installerad effekt, för baslastproduktion blir motsvarande kvot 1500 ton biokol per MW installerad effekt. Anläggningen i scenario Eksjö 1 uppskattas alltså producera 12,3 procent av den mängd biokol som är möjligt för anläggningen.

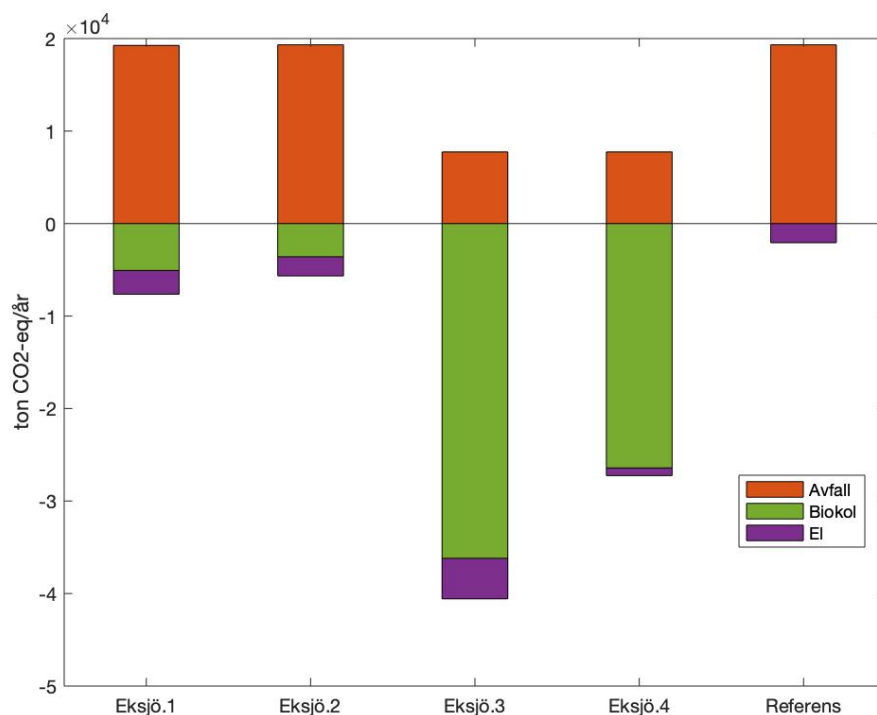
Resultatet för scenario Eksjö 2 visar på identisk fördelning av värmeproduktionen, produktionskostnaden är -34 400 000 SEK per år, biobränsleförbrukningen är 18 600 MWh biobränsle per år. Biokolsproduktionen är 1305 ton per år och anläggningen producerar 10,4 GWh värme per år. Anläggningen beräknas producera 8,7 procent av vad som uppskattas vara tekniskt möjligt. I figur 8 nedan visas produktionen under scenario Eksjö 3, då biokolsproduktion har tagit över som baslast.



Figur 8. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid scenario Eksjö 3.

Produktionskostnaden i scenario Eksjö 3 är inte relevant då priset på biokol sattes till 100 kr/kg, vilket är överdrivet högt. Det gjordes för att säkerställa baslastproduktion. Bränsleförbrukningen är 188 000 MWh biobränsle per år och biokolsproduktionen är 13 160 ton biokol per år, vilket motsvarar ett värde på 39 500 000 SEK per år. Pyrolysanläggningen producerar 77 GWh värme och 28 GWh el per år. Baslastproduktion medför att utnyttjandegraden för Eksjö 3 beräknas till 87,7 procent av vad som uppskattas tekniskt möjligt.

Priset korrigeras så att anläggningen producerar baslast även i scenario Eksjö 4, där den producerar 77 GWh värme och 9600 ton biokol per år. Utnyttjandegraden sjunker då den extra biokolsproduktion som elproduktionen medför saknas, anläggningen beräknas utnyttja 64 procent av uppskattad maxkapacitet. Klimatpåverkan från de olika fallen i Eksjö fjärrvärmenät visas i Figur 9 nedan. Som väntat resulterar scenario Eksjö 3 i lägst sammanlagda utsläpp med -32 830 ton CO₂-eq per år, där biokolet som produceras uppskattas lagra 36 190 ton CO₂-eq.

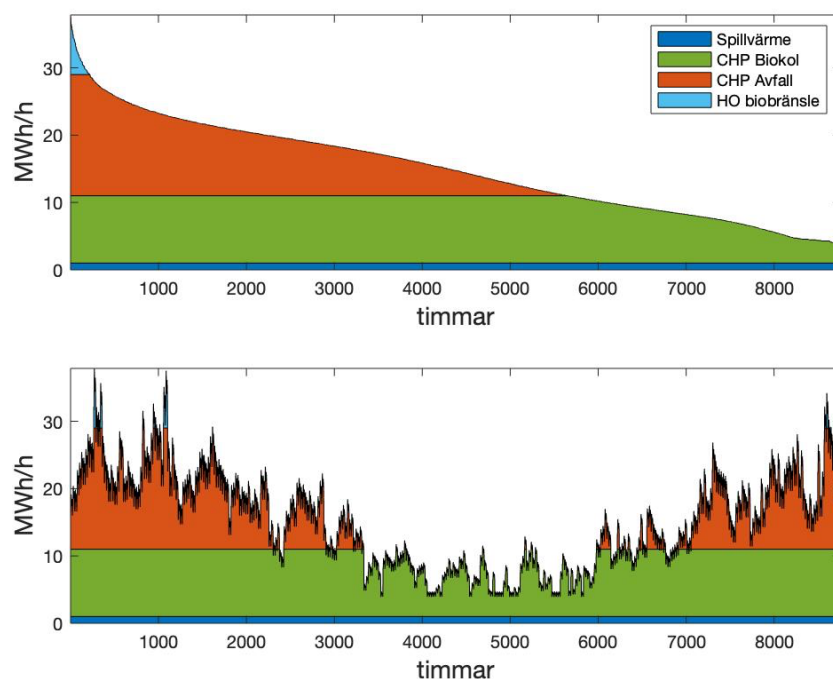


Figur 9. Fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan för de olika scenarierna i Eksjö.

För att fjärrvärmenätet i Eksjö ska bli klimatneutralt krävs en reduktion av utsläppen med minst 17 000 ton CO₂-eq per år, utsläpp som motsvarar lagringen av runt 6180 ton biokol. En BCE-anläggning med en effekt på 4,1 MW som producerar baslast skulle bidra med tillräckligt mycket netto negativa utsläpp för att fjärrvärmeproduktionen i Eksjö ska bli klimatneutral. En sådan anläggning skulle producera 36,1 GWh fjärrvärme per år och stå för 27,6 % av fjärrvärmeproduktionen.

4.3 Känslighetsanalys

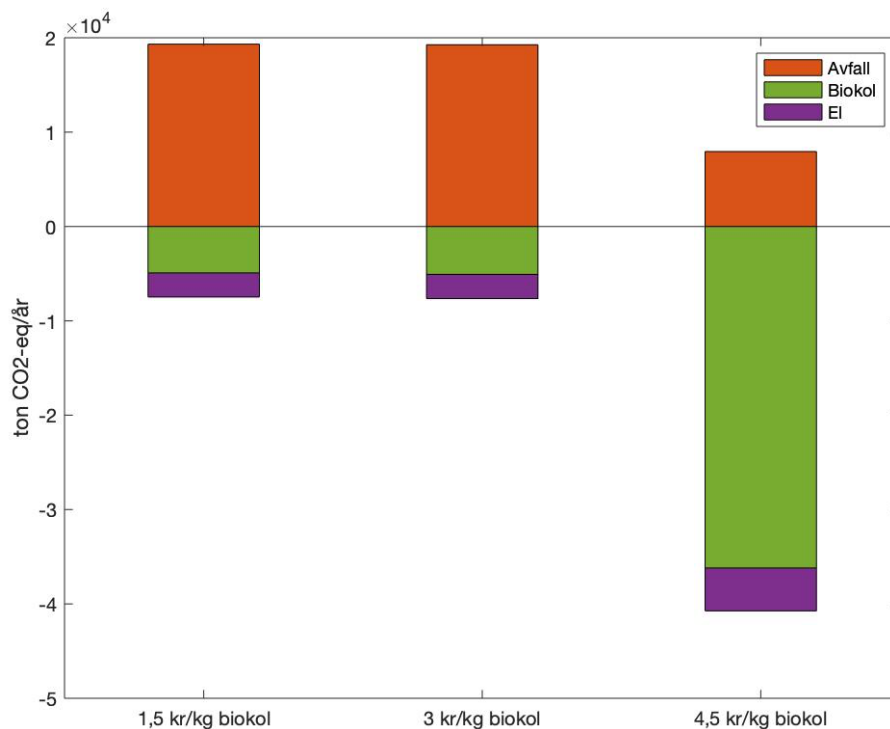
Resultatet av känslighetsanalysen tyder på att systemet är känsligt för prisändringar på biokol. Figur 10 nedan visar att ett pris på 4,5 kr/kg på biokol medför att fjärrvärmeproduktionen byter baslastanläggning jämfört med scenario Eksjö 1, vars varaktighetsdiagram med det ursprungliga priset på 3 kr/kg på biokol presenteras i figur 7.



Figur 10. Varaktighetsdiagram för fjärrvärmeproduktionen vid känslighetsanalys av scenario Eksjö 1 där priset på biokol är 4,5 kr/kg.

Resultatet tyder på att biokolsproduktion blir mest lönsamt och tar över rollen som baslast. Produktionskostnaden är – 53 348 000 SEK per år och biokolsproduktionen är 13 160 ton per år jämfört med -31 514 000 SEK per år respektive 1845 ton per år för scenario Eksjö 1.

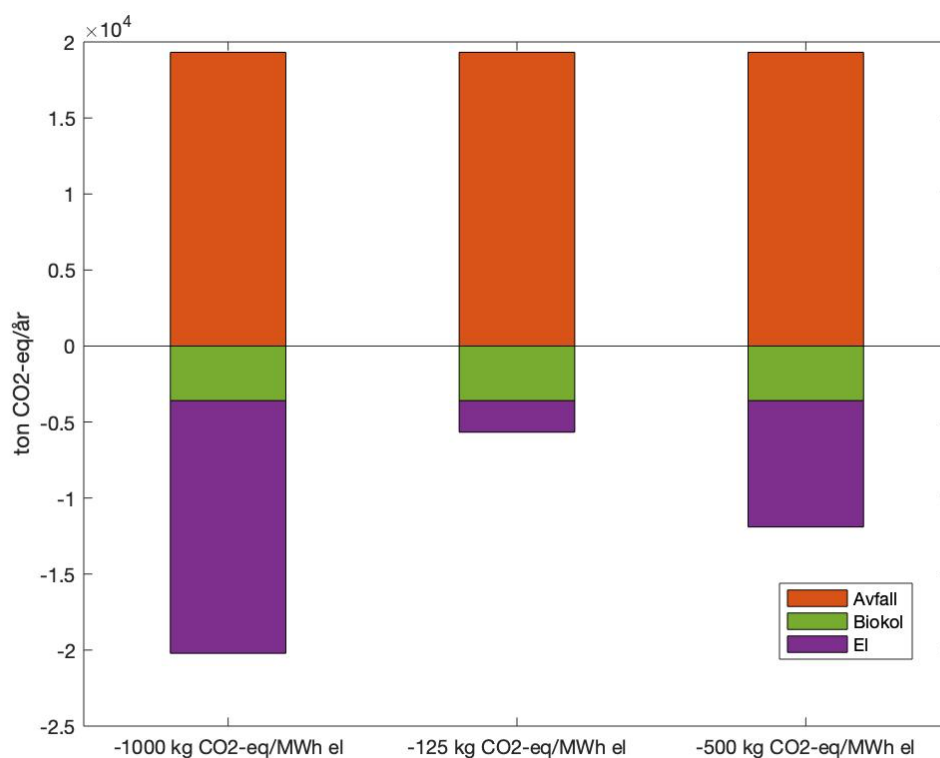
Resultatet av simuleringarna med ett pris på 1,5 kr per kg biokol vilket medför ett korrigerat bränslepris på 65 kr/MWh-bränsle visar att kraftvärmeproduktion från avfallsförbränning återigen utgör baslast i systemet. Trots den ökande kostnaden är pyrolys med produktion av biokol, värme och el fortfarande mer lönsamt än biobränslebaserad värmeproduktion. Den totala produktionskostnaden är – 33 788 000 SEK per år och biokolsproduktionen är 1788 ton per år. I figur 11 nedan sammanställs klimatpåverkan vid de olika scenarierna i känslighetsanalysen.



Figur 11. Klimatpåverkan vid känslighetsanalys av scenario Eksjö 1 där priset på biokol höjs respektive sänks med 1,5 kr/kg.

Som visas i figur 11 är fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan uppenbart känsligt för förändringar i priset på biokol, där en ökning med 50 procent medför att systemet byter baslast. Ett lägre pris på biokol medför marginella förändringar i fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan.

Figur 12 visar resultatet av undersökningen om systemens klimatpåverkan beroende på hur utsläppsfaktorn för el viktas. En högre värdering på 1000 kg CO₂-eq per MWh el medför att klimatnyttan med biokolsproduktion måste vägas mot en minskning i elproduktion som kan visa sig värderas högre både ekonomiskt och vid beräkning av systemets klimatpåverkan.



Figur 12. Klimatpåverkan vid olika utsläppsfaktorer på el för scenario Eksjö 2.

Resultatet som visas i Figur 12 tyder på att det är först när el värderas till 125 kg CO₂-eq per MWh som bidraget från biokolsproduktionen i scenario Eksjö 2 bidrar med mer utsläppsreduktion än elproduktionen. Hur utsläpp från elproduktion viktas får stor betydelse om en pyrolysreaktor som producerar biokol och värme ersätter en kraftvärmeanläggning.

5. Diskussion

5.1 Sammanfattning av resultat

Jämfört med de flispannor som finns i de befintliga fjärrvärmesystemen tycks BCE-anläggningar medföra lägre rörliga produktionskostnader. Genom undersökningen av befintliga pyrolysanläggningar och teknikens mognadsgrad konstateras att det finns anläggningar på marknaden som redan finns installerade runt om i Sverige och att liknande modeller kan täcka baslasten i både Ingatorp och Mariannelund. I dagsläget finns ingen installerad pyrolyreaktor i Sverige med en effekt som skulle täcka baslasten i Eksjös fjärrvärmenät, men de finns på marknaden.

De rörliga produktionskostnaderna för BCE är större än de rörliga produktionskostnaderna för kraftvärmeproduktion från energiåtervinning av avfall. En BCE anläggning i dagens fjärrvärmenät i Eksjö skulle därför få begränsad drifttid. Att investera i mindre pyrolyreaktorer som producerar baslast i de mindre fjärrvärmenäten är antagligen mer lönsamt då dessa kan hålla kontinuerlig maxproduktion. Enligt simuleringarna medför en BCE-anläggning som täcker baslast i Ingatorp en reducering av systemets rörliga produktionskostnad med 448 000 SEK per år. Anläggningen skulle producera 165 ton biokol per år vilket motsvarar infångning och lagring av 454 ton CO₂-eq per år. Fjärrvärmeproduktionens klimatpåverkan för systemet blir -129 kg CO₂-eq/MWh värme och BCE-anläggningen skulle stå för 25,9 % av fjärrvärmeproduktionen. Motsvarande anläggning i Mariannelund producerar 750 ton biokol per år och reducerar den rörliga produktionskostnaden med 1 960 000 SEK per år. Fjärrvärmeproduktionen i systemet skulle ha en klimatpåverkan på -132 kg CO₂-eq/MWh och BCE-anläggningen skulle i detta fall stå för 26,4 % av fjärrvärmeproduktionen.

Om en BCE-anläggning på 10 MW ansluts till Eksjös fjärrvärmenät skulle den totala rörliga produktionskostnaden minska med runt 4 980 000 SEK per år och dess klimatpåverkan minska från 17 000 ton CO₂-eq per år till 11 620 respektive 13 658 ton CO₂-eq per år beroende på om anläggningen producerar värme och el eller enbart värme. Fjärrvärmeproduktionen skulle ha en klimatpåverkan på 88,9 kg CO₂-eq/MWh respektive 104,5 kg CO₂-eq/MWh, jämfört med den befintliga klimatpåverkan som beräknas vara 130,8 kg CO₂-eq/MWh. Trots påtaglig effekt på systemets rörliga produktionskostnad och klimatpåverkan är det tydligt att effekten av en sådan anläggning inte är lika omfattande som BCE-anläggningar som producerar baslast. Drifttiden skulle inte ändras om en mindre anläggning ansluts till systemet, den skulle få en något bättre utnyttjandegrad men fortfarande långt ifrån optimalt.

Resultatet från känslighetsanalysen visade att BCE kan ta över som baslast i Eksjös fjärrvärmenät om priset på biokol är 4,5 kr per kg. Om en BCE-anläggning på 10 MW ansluts till Eksjös fjärrvärmenät under dessa omständigheter skulle den sammanlagda rörliga produktionskostnaden minska med runt 16 850 000 SEK per år. Biokolsproduktionen från systemet skulle bli samma som för scenario Eksjö 3 och uppskattas till 13 160 ton biokol, vilket motsvarar infångning och lagring av 36 190 ton CO₂-eq per år. Systemets fjärrvärmeproduktion skulle ha en klimatpåverkan på -251,2 kg CO₂-eq / MWh värme och BCE-anläggningen stå för 58,8 % av fjärrvärmeproduktionen. Systemet är alltså som väntat känsligt för ändringar i priset på biokol, men inte fullt lika känsligt för en nedgång i pris som ett ökat pris. Känslighetsanalysen visade att BCE har lägre rörlig produktionskostnad än biobränsleeldade värmepannor även vid priser på 1,5 kr per kg.

5.2 Ökad efterfrågan på biomassa

En svaghet hos BCE-anläggningar är den ökade förbrukningen av biomassa. Efterfrågan på biomassa ökar från flera håll och i en rapport där en sammanställning av alla annonserade omställningar och projekt som kräver skogsråvaror tillsammans med uppsatta naturskyddsmål presenteras menar forskarna bakom studien att skogens resurser inte räcker till (Lundmark 2020). En begränsad tillgång på biomassa är ett tydligt hot mot BCE-anläggningars långsiktiga lönsamhet och det finns en inneboende målkonflikt mellan naturvård och biologisk mångfald som ska vägas mot nationella och lokala klimatmål. En ökad och mer diversifierad efterfrågan på sågverkens restprodukter gör att valet av användningsområde för deras produkt spelar en central roll för att uppnå lokala och nationella klimatmål. För sågverken kan biokolsproduktionen erbjuda ett sätt att kompensera för utsläpp vid produktion och distribution av deras produkter medan de ställer om till fossilfria alternativ.

För att fjärrvärmeproduktionen i Eksjö kommun ska bli klimatneutral måste utsläppen minska med drygt 17 000 ton CO₂-eq per år, vilket motsvarar en biokolsproduktion på 6180 ton biokol per år. Baslastproduktion av BCE-anläggningar med kraftvärmeproduktion och en sammanslagen effekt på 4,1 MW täcker behovet av netto-negativa utsläpp. Det krävs runt 88 300 MWh biobränsle för att bli klimatneutral. Resultatet av massanalysen visar att det finns tillräckligt med tillgänglig biomassa på den lokala marknaden genom biprodukter från sågverk inom kommunen för att möta den ökade efterfrågan på biomassa även i det fall då konsumtionen är som störst. I scenario Eksjö 3 är konsumtionen 188 000 MWh biobränsle vilket kan jämföras med runt 271 000 MWh biobränsle från sågverken som medverkade i projektet. Det ska tilläggas att inte alla sågverk inom kommunen deltog i studien och att marginalen mellan den ökade efterfrågan och lokalt tillgänglig biomassa är större än ovanstående. Att det finns bränsle tillgängligt på en lokal marknad borde medföra mindre risker för att stå utan biomassa om något sker på världsmarknaden samtidigt som bränslets ursprung går att spåra vilket kan vara avgörande för eventuell försäljning av utsläppsrätter. Det minskar även på transporter, vilket är en stor ekonomisk kostnad och står för de utsläpp som allokeras till produktionen av biobränsle och följaktligen även biokol. I det undersökta systemet är det kortaste avståndet mellan sågverk och fjärrvärmeverk runt 400 m fågelvägen och det längsta runt 30 km. Kostnader och utsläpp kopplade till transporter undersöks inte i projektet men borde rimligtvis vara förhållandevis låga. En annan osäkerhet är kostnader för drift och underhåll av reaktorerna som inte undersöks i projektet.

5.3 Klimatpåverkan

En utförlig LCA är utanför projektets avgränsning, således råder definitivt osäkerhet kring BCE-anläggningarna och systemets sammanlagda klimatpåverkan, däruti hur stor biokolsproduktionen är. Beräkningarna av klimatpåverkan för systemen grundar sig i en produktion på 70 kg biokol per MWh biobränsle. Jämfört med underlaget från tillverkare av pyrolysanläggningar är 70 kg biokol per MWh bränsle lågt, i studien påvisades produktionsintervallet 46–250 kg biokol per MWh biobränsle, där många tillverkare påstår att de har en produktion på 120 kg biokol per MWh. En energidensitet på 0,75 MWh/ m³ och en bulkdensitet på 250 kg / m³ för flis medför att en produktion på 250 kg biokol per MWh biobränsle är 75 procent av initial vikt inklusive fukt, vilket känns osannolikt. Osäkerheten stärks av klimatpåverkan från användandet av biokol, där klimatpåverkan vid applicering som jordförbättringsmedel har ett brett osäkerhetsintervall.

De utsläppsfaktorer som används för att beräkna systemets klimatpåverkan är aktuella vid eventuell ansökan om investeringsstöd genom klimatklivet. Känslighetsanalysen visar på hur stor påverkan utsläppsfaktorn för el har för systemets klimatpåverkan, men där den utsläppsfaktor som används inom klimatklivet medför större sänkning av systemets klimatpåverkan genom biokolsproduktion än elproduktion. Då projektet undersöker klimatpåverkan från värmeproduktionen bidrar elproduktionen med minskade utsläpp genom att substituera för annan elproduktion. Detta kan ses som utsläppsreduktion och ska inte blandas ihop med den infångning och lagring av kol som erhålls genom biokolsproduktion. Vid beräkning av ett systems klimatpåverkan kan substituerbarhet medföra netto negativa utsläpp men att de egentliga utsläppen som påverkas flyttas utanför systemets gränser där då annan elanvändning kan klassas som klimatneutral. En minskning av utsläpp kan alltså inte medföra netto negativa utsläpp som på sikt har potentialen att minska halterna av växthusgaser i atmosfären på samma sätt som BCE eller annan teknik för infångning och lagring av koldioxid. BCE-anläggningarnas interna elförbrukning samt huruvida de producerar el varierar från modell till modell och hur priset på anläggningarna samt driftskostnader påverkas av elproduktion är en källa till osäkerhet och bör undersökas noggrannare om man väljer att satsa på BCE-anläggningar.

5.4 Marknad för biokol

En utmaning med implementeringen av BCE är att skapa efterfrågan på produkten samt struktur kring hantering och distribution av biokol för att få tillgång till marknaden. Det finns nu ännu en fysisk restprodukt från fjärrvärmeproduktionen som ska hanteras men nu med ett stort ekonomiskt värde. Det kan vara rimligt att börja med en mindre anläggning så att distributions- och värdekedjan för det producerade biokolet etableras innan implementering av större anläggningar. Detta skulle utöver minskad osäkerhet kring prestandan på BCE-anläggningarna även minska osäkerheter i den ekonomiska kalkylen kring priset på drift, underhåll och bränsle, samt hantering, certifiering och eventuell laddning av biokol och dess försäljningspris. Studien visade ett prisintervall på runt 3-60 kr per kg vilket kan anses vara en för stor osäkerhet för en större investering. Även intäkter från utsläppscertifikat är en osäkerhet. Priset på utsläppscertifikat varierar och det är oklart om eller när biokolsproduktion blir en etablerad del inom internationella marknader som EU ETS.

För att ett lokalt cirkulärt system ska skapas krävs utöver de lokala sågverkens medverkan även en lokal efterfrågan på samt återförsäljare av producerat biokol. En lokal användning av biokolet skulle innebära kortare transporter och således minska klimatpåverkan från användningen av biokol. Om volympotentialen för att använda biokol som jordförbättringsmedel inom Jönköpings län antas innebära en potentiell efterfrågan på 56 000 ton biokol per år tillgodoser produktionen på 6180 ton biokol för att fjärrvärmenätet i Eksjö ska bli klimatneutralt runt 11 % av denna potentiella efterfrågan. Eksjö kommun utgör runt 8 procent av Jönköpings läns totala area, huruvida detta förhållande är nära andelen avsedd jordbruksareal är oklart. Användningen av biokol kan potentiellt innebära lägre klimatpåverkan och bättre lönsamhet för lokalt jordbruk genom minskad efterfrågan på konstgödsel och ökad produktion. Med den svåra torkan sommaren 2018 med nödslakt av boskap och skenande priser på djurfoder som följd kvar på näthinnan hos många lokala lantbrukare samt prognoser om allt mer frekvent förekommande extrema väderfenomen som torka och extrem nederbörd till följd av klimatförändringar kan biokolets egenskap att öka markens resiliens mot torka komma att skapa hög efterfrågan på biokol. Biokol kan på så sätt öka både ekonomisk trygghet för lokala jordbrukare men även för lokal livsmedelsförsörjning. Utöver jordförbättringsmedel visar litteraturstudien flertalet andra potentiella lokala användningsområden för biokol.

5.5 Konkurrerande teknik och investeringskostnader

Den exakta investeringskostnaden för en BCE-anläggning är svårt att få fram då tillverkare ofta är med vid installation och upphandling vanligtvis sker via offerter. De exempel som återfanns i litteraturstudien var anläggningen i Hammenhög som producerade värme till 60 kunder. Det projektet fick stöd från Klimatklivet som täckte 65 procent av projektets budget som uppgick till 31 miljoner SEK. Kostnaden för BCE-anläggningen i Stockholm som producerar värme till 80 kunder kostade 4 miljoner SEK. Det är en tydlig diskrepans mellan dessa uppgifter och det är oklart vad som ingick i kostnaden för det sistnämnda exemplet. Även om de skiljer sig åt kan dessa uppgifter ge en fingervisning om hur stor investeringskostnaderna kan vara för BCE-anläggningar som producerar baslast i Ingatorp eller Mariannelund. Det finns investeringsstöd att söka där sammanlagt tolv biokolsprojekt har erhållit stöd genom klimatklivet sedan 2016. I dessa projekt täckte Klimatklivet från 40 till 65 procent av investeringskostnaden.

En alternativ teknik för att uppnå infångning och lagring av kol är BECCS där dess fördel jämfört med BCE är en mindre bränsleförbrukning per producerad enhet värme. Det som talar mot BECCS vid en jämförelse mot BCE är dels att tekniken inte har uppnått samma mognadsgrad som BCE, men det finns pilotprojekt. En annan svaghet för BECCS är kostnaden för hanteringen av den infångade koldioxiden, som då är i gasform. Exakt hur hanteringen ska gå till är ännu inte fastställt men en lösning är att lagra koldioxiden i gamla oljefyndigheter i Nordsjön, där gasen pumpas ned långt ner i berggrunden och genom högt tryck stabiliseras. Gasen måste då transporteras först till en hamn och sedan till slutförvaret, vilket både resulterar i en kostnad och ökad klimatpåverkan. De föreslagna BCE-anläggningarna gör det möjligt att utnyttja kolet som lagras och skapar ett cirkulärt system där BECCS snarare kan tolkas som en linjär lösning.

Det finns som nämnt flera anledningar till varför det kan vara aktuellt att satsa på BCE i Eksjö, inte minst för att uppnå lokala klimatmål eller värmesektorns egen färdplan mot att bidra med netto negativa utsläpp till år 2045. BCE tycks stå sig väl i konkurrensen med andra tekniker för att uppnå negativa utsläpp. Det är rimligt att den ekonomiska aspekten väger tungt när beslut om större investeringar ska tas, och det finns alltid en risk att satsa på ny teknik men det finns också ett egenvärde i att vara med och i framkant av den omfattande omställning som samhället som helhet och energisektorn i synnerhet står inför. Upplägget med BCE passar som hand i handske med en cirkulär ekonomi och skapar en lokal värdekedja som gagnar flera aktörer samtidigt som det skapar flera ekonomiska, miljörelaterade och sociala mervärden. Avslutningsvis ger BCE berörda aktörer möjlighet att ta ansvar för sin klimatpåverkan samtidigt som det kan inspirera och engagera andra.

6. Slutsatser

Sammantaget tyder resultatet från simuleringarna och litteraturstudien på att förutsättningarna för BCE i fjärrvärmenäten i Eksjö kommun är goda. Det finns osäkerhet både gällande ekonomisk kalkyl och systemens klimatpåverkan men en investering i en mindre anläggning för att minska ovan nämnda osäkerheter kan anses vara motiverad av de möjligheter som BCE medför. Lärdomarna och prestationen hos de mindre anläggningarna kan då få avgöra huruvida en större anläggning för systemet i Eksjö är aktuellt.

- Resultatet tyder på att den ökade efterfrågan på biobränsle för att fjärrvärmeproduktionen i Eksjö kommun ska bli klimatneutral kan tillgodoses av biprodukter från lokala sågverk med god marginal.
- BCE-anläggningar med sammanlagt 4,1 MW termisk effekt som producerar baslast producerar tillräckligt mycket biokol för att uppnå klimatneutralitet i fjärrvärmeproduktionen.
- Det finns modeller på den befintliga marknaden som motsvarar dimensionerna på anläggningar som krävs för att uppnå klimatneutralitet i fjärrvärmeproduktionen.
- BCE tycks ha lägre rörlig produktionskostnad för värme än befintliga biobränsleeldade värmepannor men det råder osäkerhet om det kan konkurrera med kraftvärmeproduktion från energiåtervinning av avfall.

Referenser

Åberg, M., Widén, J. 2013. *Development, validation and application of a fixed district heating model structure that requires small amounts of input data*. Energy Conversion and Management, 75, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.032>

Åberg, M. 2020. *Systemaspekter på implementering av tekniker för koldioxidavskiljning i fjärrvärmeproduktionssystemet i Uppsala*.

Azzi, E. S., Karlton, E., & Sundberg, C. 2019. *Prospective life cycle assessment of large scale biochar production and use for negative emissions in Stockholm*. Environmental Science and Technology, 53(14), 8466–8476. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01615>

Beston, 2020. *Charcoal making machine*. Tillgänglig: <https://bestonpyrolysisplant.com/charcoal-making-machine/> [2020-11-26]

Bioenergitidningen, 2017. *Skånefrö startar unik klimatpositiv fjärrvärme med produktion av biokol från jordbrukets restprodukter*. Tillgänglig: <https://bioenergitidningen.se/biovarme/skanefro-startar-unik-klimatpositiv-fjarrvarme-med-produktion-av-biokol-fran-jordbrukets-restprodukter> [2020-11-26]

Biomaccon, 2018. *Biomaccon Compact Converter: System explanation*. Tillgänglig: https://ab8199f1-f56c-4f07-9543-38a7074767a8.filesusr.com/ugd/7072b5_55e782eb33324a68908e612154aec3ab.pdf [2020-11-26]

Compag, 2020. *Flyer CPP500-1500*. Tillgänglig: https://www.compag.ch/images/gallery/pyrolyseanlagen-pdf/EN_FlyerCPP500-1500.pdf [2020-11-26]

Downie, A. 2011. *Biochar and Bioenergy from waste organics – a New Zealand perspective*. Pacific Pyrolysis Pty Ltd. Tillgänglig: <https://www.wasteminz.org.nz/wp-content/uploads/3b.Downie.pdf> [2020-11-26]

EBC. 2020 *The European Biochar Certificate (EBC)*. Tillgänglig: <https://www.european-biochar.org/en> [2020-11-24]

Ecoera, 2020. *System and technology solution*. Tillgänglig: <https://ecoera.se/pages/system-and-technology-solution> [2020-11-26]

Eksjö Energi. 2020. Korrespondens.

Energimyndigheten. 2017. *Värmevärden och emissionsfaktorer*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/statistik/branslen/varmevarden-och-emissionsfaktorer1/> [2020 - 10 - 12]

Energimyndigheten. 2020a *Trädbränsle- och torvpriser*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/statistik/denofficiellastatistiken/statistikprodukter/tradbransle--och-torvpriser/> [2020-11-26]

Energimyndigheten. 2020b. *Läget på de globala energimarknaderna. 45.2020*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/om-oss/lagesrapporter/globala-energimarknader/2020/laget-pa-de-globala-energimarknaderna--v.-45-2020.pdf> [2020-11-26]

GreenPower, 2020a. *Continous charcoal kiln BIO-KILN*. Tillgänglig: <https://greenpower.equipment/produkcija/continuous-charcoal-kiln-bio-kiln/> [2020-11-26]

GreenPower, 2020b. *Charcoal Kiln Continuous*. Tillgänglig: <https://greenpower.equipment/produkcija/charcoal-kiln-ck-continuous/> [2020-11-26]

GreenPower. 2020c. *The fundamental principle of our business pyrolysis of wood*. Tillgänglig: <https://greenpower.equipment/the-fundamental-principle-of-our-business-pyrolysis-of-wood/> [2020-11-26]

IPCC. 2019. *Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development*. Tillgänglig: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf [2021-02-18]

Lundmark, T. 2020. *Skogen räcker inte - hur ska vi prioritera?* Future Forests Rapportserie 2020:4. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå, 24 sidor.

Lundvall, S., Hellsten, C. 2020. *Biokol i Jönköping – för naturen, klimatet och människorna*. Tillgänglig: <https://www.ostravatterbranterna.se/wp-content/uploads/2020/05/biokol-i-jonkoping-forstudie-rapport-20200504.pdf> [2020-11-26]

Naturvårdsverket. 2020a. *Begränsad klimatpåverkan*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Begransad-klimatpaverkan/> [2020-10-01]

Naturvårdsverket. 2020b. Tillgänglig: <https://naturvardsverket.se/Nyheter-och-pressmeddelanden/Ny-utredning-visar-att-Sverige-har-stor-potential-att-minska-sina-utslapp-genom-lagring-av-koldioxid-fran-biobranslen-bio-CCS-/> [2020-10-01]

Naturvårdsverket. 2020c. *Stöd i miljöarbetet*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/bidrag-och-ersattning/bidrag/klimatklivet/berakna-utslappsminskning.pdf> [2020-10-01]

Osslund, F. 2020. *Prioritising biochar application to arable land in Sweden*. KTH, Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad (ABE), Hållbar utveckling, miljövetenskap och teknik. Serie: TRITA-ABE-MBT ; 20440.

Pyreg, 2021. *Carbonization*. Tillgänglig: <https://www.pyreg.de/karbonisierung/?lang=en> [2021-02-16]

Pyreg, 2020b. *P1500 Biomass*. Tillgänglig: <https://www.pyreg.de/p1-500-biomasse/?lang=en> [2020-11-26]

Pyreg, 2020c. *P500 Biomass*. Tillgänglig: <https://www.pyreg.de/p500-biomasse/?lang=en> [2020-11-26]

Polvax-Ukraine, 2020a. *Technology*. Tillgänglig: <http://pyrolys.net/technology/en/2> [2020-11-26]

Polvax-Ukraine, 2020b. *FAQ*. Tillgänglig: <http://pyrolys.net/faq/en/2> [2020-11-26]

Rest till Bäst, 2019. *Rest till Bäst Go Global Förstudie*. Tillgänglig: <https://biokol.org/wp-content/uploads/2019/12/goglobalforstudie.pdf> [2020-11-26]

Schmidt H, Hagemann N, Draper K, Kammann C. 2019. *The use of biochar in animal feeding*. PeerJ 7:e7373 <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>

Skatteverket. 2020. *Skatt på el*. Tillgänglig: <https://www.skatteverket.se/foretagochorganisationer/skatter/punktskatter/energiskatter/skattesatserochvaxelkurser.4.77dbcb041438070e0395e96.html> [2020-11-04]

Skånefrö. 2020. *Biokol 15 L*. Tillgänglig: <https://skanefro.se/shop/gronyta/biokol/biokol-15-l/> [2020-11-24]

Stockholm Exergi, 2020. *Så arbetar vi för att skapa minusutsläpp*. Tillgänglig: <https://www.stockholmexergi.se/minusutslapp/> [2020-11-26]

Stockholm Vatten och Avfall, 2017. *Ditt trädgårdsavfall förbättrar jorden*. Tillgänglig: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf1/informationsmaterial/avfall/projekt/biokol/biobroschyr.pdf> [2020-11-26]

Strömberg, B., Herstad Svärd, S. 2012. *Bränslehandboken*. Värmeforsk. Stockholm. Tillgänglig: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/17831/braenslehandboken-2012-vaermeforskrappport-1234.pdf> [2020 - 10 - 12]

Veg Tech. 2020. *Biokol-klimatsmart nyhet*. Tillgänglig: <https://www.vegtech.se/sedumtak---grona-tak/biokol---klimatsmart-nyhet/> [2020-11-24]

Vägen till en klimatpositiv framtid. 2020. (SOU 2020:4) Stockholm:Karlsson,Å.

Weber,K., Quicker,P. 2017. *Properties of biochar*. FUEL, Vol 217, p 240–261. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054> [2020-11-24]

Woolf,D., Amonette,J., Street-Perrott,F.,Lehmann,J.,Joseph,S. 2010. *Sustainable biochar to mitigate global climate change*. NATURE COMMUNICATIONS | 1:56 | DOI: 10.1038/ncomms1053.

Bilagor

Bilaga A. Massanalys

Data

Dataunderlag om tillgänglig biobränsle från biprodukter har erhållits via korrespondens med sågverk i Eksjö kommun. Nedan sammanställs tillgänglig biomassa inom projektets avgränsning.

- Bark ca 100.000 m³
- Cellulosaflis, ca 110.000 ton
- Sågspån ca 140.000 m³
- Kutterspån ca 15.000 ton

- Torrflis (avkap som krossas till bränsle) ca 15.000 m³
- Cellulosaflis: 41500 m³fub
- Bark, spån och torrflis: 54 GWh
- Kutterspån: 4000 ton

Metod

För att kunna användas i modellen skall energiinnehållet i fraktionerna som är aktuella att använda inom projektets ramar beräknas. Bränslets densitet slås upp i bränslehandboken (Strömberg, Herstad 2012) och dess värmevärde hämtas från Energimyndigheten (Energimyndigheten 2017).

Resultat

Den största delen av sågverkens biprodukter är cellulosaflis vilket går till massa – och pappersindustrin vilket utesluter detta som bränsle. Resultatet av inverteringen för övriga bränslen presenteras i Tabell A1 nedan.

<i>Bränsle</i>	<i>Indata</i>	<i>Omvandlingsfaktor</i>	<i>Energiinnehåll [MWh]</i>	<i>Massa [ton]</i>
Bark	100 000 [m ³]	0,6 [MWh/m ³] [1]	60 000	55 000 [2]
Sågspån	140 000 [m ³]	0,75 [MWh/m ³][1]	105 000	49 000 [2]
Kutterspån	19 000 [ton]	2,14 [MWh /ton][1][2]	41 000	19 000 [2]
Torrflis	15 000 [m ³]	0,75[MWh/m ³][1]	11 250	5 250 [2]
Bark, spån och torrflis	54 [GWh]	1000	54 000	18 900 [2]

Tabell A1. Sammanställning av tillgänglig biomassa och dess energiinnehåll. Källa: [1] (Energimyndigheten 2017), [2] (Strömberg, Herstad 2012).

Samtliga biprodukter har befintliga användningsområden, där de förutom direkt energiproduktion går till bland annat stallströ, pellets och spånskivor.

Tabell A2 är hämtad från Bränslehandboken och visar några viktiga parametrar och egenskaper för den aktuella biomassan spån, flis och bark (Strömberg, Herstad 2012).

Tabell A2. Bränsleegenskaper hos spån, flis, pulver och bark. Källa: (Strömberg, Herstad 2012)

Kapitel	Bränsle	Fukt vikt-%	Aska vikt-% TS	Svavel vikt-% TS	Klos vikt-% TS	Hcal MJ/kg (torrt, askfritt)	Bulkdensitet kg/m ³
Trädbränslen							
3.1	Trä (spån, flis, pulver)	8-60	0,4-0,6	0-0,3	0-0,05	16-18	200-350
Övriga trädbränslen							
3.5	Bark	21-65	2-6	0-0,1	0-0,02	20-25	300-550

Referenser

Energimyndigheten. 2017. *Värmevärdet och emissionsfaktorer*. Tillgänglig:
<http://www.energimyndigheten.se/statistik/branslen/varmevarden-och-emissionsfaktorer1/>
 [2020 - 10 - 12]

Strömberg, B., Herstad Svärd, S. 2012. *Bränslehandboken*. Värmeforsk. Stockholm.
 Tillgänglig:
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/17831/braenslehandboken-2012-vaermeforskrapport-1234.pdf> [2020 - 10 - 12]

Bilaga B. Exempel Modellinställningar

Val av område

Jönköping

Mariannelund Ref

Save

Fuel Costs

	Cost HO	Cost CHP
Fuel 1	1000	0
Fuel 2	250	0
Fuel 3	0	0
IMH	0	

Heat and electricity production units

	Capacity (MW)	Efficiency	e-value	Revision Month
Fuel 1 HO	4	1		0
Fuel 2 HO	6	1		0
Fuel 3 HO	0	1		0
Fuel 1 CHP	0	1	1	0
Fuel 2 CHP	0	1	1	0
Fuel 3 CHP	0	1	1	0
HP / EL Boiler	0	1		0
IMH	0	1		0

Heat Demand

Annual prod. Heat demand (GWh)20

System capacity factor0.34

System min temp-25

System mean temp

Industrial heat demand (MW)0

Distribution efficiency1

Waste Heat re-cooler capacity

Capacity0

heat waste cost (SEK/MWh)0

Electricity price

Year2018

Generate electricity price profile

Base price level0

night | day | Jun-Aug | Nov-Mar | May-Apr | Sep-Oct

El. price profile constants00111

El. taxes (SEK/MWh)0

Heat storage (Rock Cavern)

Temperatures

T₁ (C)0

T₂ (C)0

T_{air} (C)5

Use Storage?

Dimensions

r (m)0

LW (m)0

LT (m)0

LB (m)0

H (m)0

Heat conductivity (W/mK)

Top0

wall0

bottom0

Volume (m3)0

Storage Capacity (GWh)0

Load Capacity (MW)0

Unload capacity (MW)0

Start value (MWh)0

dec-feb | mar-may | jun-aug | sep-nov

Load Cost (SEK/MWh)

Unload Cost (SEK/MWh)

Run Simulation

Reset to standard

Quit

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energioghteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000